



DESARROLLO DE COJINETES DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA

Andrés Ignacio Saganome Ávila
Julio Alberto Camacho Fajardo

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Tunja, Colombia
2021

DESARROLLO DE COJINETES DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA

Andrés Ignacio Saganome Ávila
Julio Alberto Camacho Fajardo

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:
PhD. Ing. Carlos Ramón Batista Rodríguez

Línea de Investigación:
Desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de energía renovable

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Tunja, Colombia
2021

Nota de aceptación

Este trabajo ha sido revisado y analizado encontrándose que reúne los requisitos de elaboración y presentación exigidos por la Universidad Antonio Nariño, por lo cual notificamos su aprobación.

Director:**PhD. Ing. Carlos Ramón Batista Rodríguez**

Jurado 1**Mg. Ing. Omar F. Rojas Moreno**

Jurado 2**Mg. Ing. Mercy Tatiana Villate Fonseca**

Tunja, Julio de 2021

Lema

*La ciencia puede divertirnos y fascinarnos,
pero es la ingeniería la que cambia el mundo.*

*Isaac Asímov (escritor y científico
estadounidense)*

Agradecimientos

A nuestros padres, por habernos brindado la confianza y el apoyo requerido para este proceso de formación profesional.

A la Universidad Antonio Nariño, por poner a nuestra disposición las herramientas, dispositivos y espacios de trabajo necesarios para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto.

A nuestro director de tesis, Dr. Carlos Ramón Batista Rodríguez, por todos sus conocimientos prestados, tiempo empleado y paciencia.

Resumen

Este proyecto presenta el diseño, construcción y modelamiento de un prototipo de cojinetes de levitación magnética destinado a apoyar investigaciones de la comunidad educativa de la Universidad Antonio Nariño, Sede Tunja. Para el desarrollo del estudio, primero se determinaron los parámetros de los campos magnéticos, realizando cinco pruebas de fuerza de sujeción con diferentes materiales, obteniendo que las muestras con una lámina ferromagnética de 1mm de espesor presentan un aumento bastante alto con respecto a las otras pruebas. Dentro de los requerimientos técnicos para crear un campo magnético estable que pueda mantener un eje de masa m se estableció que a través de la levitación se logra disminuir considerablemente la fricción ocasionada por el rozamiento μ de elementos mecánicos, asimismo que el eje se sostenga con una masa aproximada de 350 gramos, un diámetro de media pulgada y una longitud de 8 pulgadas y que el diámetro interior del cojinete tenga media pulgada para que sus campos magnéticos sean estables y se puedan repeler sin dificultad. El diseño del prototipo de cojinete magnético se hizo mediante el programa de diseño Autodesk Inventor y la construcción del prototipo se comprobó con pruebas de funcionamiento a diferentes cargas en un ambiente natural. Las simulaciones para verificar la resistencia a flexión bajo distintas cargas fueron a 30 N, 100 N y 300 N, obteniendo que el esfuerzo máximo generado con una carga de 100 N no excede al de la pieza, por tanto, es resistente. También se efectuó una simulación de resistencias a torsión del prototipo construido de ABS con carga en su centro de 25 Nm, donde se pudo verificar que el desplazamiento, el factor de seguridad y el esfuerzo realizado no sufren alteraciones en la pieza. Con las pruebas de ensayos realizadas con el eje levitando entre los cojinetes, se concluye que éste levita y rota exitosamente. Los resultados de las simulaciones determinaron la resistencia del material.

Palabras clave: Cojinetes, esfuerzo, resistencia, torsión, flexión, levitación magnética, prototipo ABS.

Abstract

This project presents the design, construction and modeling of a prototype of magnetic levitation bearings destined to support research of the educational community of the Antonio Nariño University, Tunja Headquarters. For the development of the study, first the parameters of the magnetic fields were determined, carrying out five clamping force tests with different materials, obtaining that the samples with a 1mm thick ferromagnetic sheet present a fairly high increase compared to the other tests.. Within the technical requirements to create a stable magnetic field that can maintain an axis of a mass (m), it was established that through levitation the friction caused by friction [μ] of mechanical elements is achieved, likewise that the shaft is supported with a mass of approximately 350 grams, a diameter of half an inch and a length of 8 inches and that the inside diameter of the bearing is half an inch so that its magnetic fields are stable and can be repelled without difficulty. The design of the magnetic bearing prototype was done using the Autodesk Inventor design program and the construction of the prototype was verified with functional tests at different loads in a natural environment. The simulations to verify the flexural strength under different loads were at 30N, 100N and 300N, obtaining that the maximum effort generated with a load of 100N does not exceed that of the piece, therefore, it is resistant. A simulation of torsional strengths of the prototype built of ABS with a center load of 25 Nm was also carried out, where it can be verified that the displacement, the safety factor and the effort made do not suffer alterations in the part. With the tests of tests carried out with the shaft levitating between the bearings, it is concluded that it levitates and rotates successfully. Likewise, the results of the simulations determined the strength of the material.

Keywords: Bearings, effort, resistance, torsion, bending, magnetic levitation, ABS prototype.

Contenido

Resumen.....	V
Lista de figuras.....	X
Lista de tablas.....	XII
Lista de anexos.....	XIII
Introducción.....	1
1. Marco Teórico.....	4
1.1 Estado del arte.....	4
1.2 Reseña histórica del Magnetismo.....	8
1.3 Levitación Magnética.....	9
1.4 Cojinetes.....	13
1.4.1 Tipos de cojinetes.....	15
1.5 Principios de Levitación.....	20
1.5.1 Principio de Levitación por repulsión.....	20
1.5.2 Principio de Levitación por atracción.....	21
1.6 Magnetismo e Imanes.....	22
1.6.1 Imanes Naturales.....	23
1.6.2 Imanes Artificiales.....	24
1.6.3 Imanes Permanentes.....	24
1.6.4 Imanes Temporales.....	25
1.6.5 Electroimanes.....	26
1.6.6 Ley de Faraday.....	26
1.7 Susceptibilidad y Permeabilidad.....	27
1.8 Ejes mecánicos.....	27
1.8.1 Tipos de ejes.....	27
1.8.2 Materiales usados en la construcción de árboles de transmisión.....	29
2. Diseño de cojinetes de levitación magnética.....	31
2.1 Requerimientos.....	32
2.2 Determinación de los parámetros de los campos magnéticos.....	32
2.2. Diseño conceptual.....	36
2.3 Pruebas realizadas con diferentes masas en ambiente natural.....	41
2.4 Pruebas de resistencias a torsión.....	48
3. Construcción y Ensayos del cojinete magnético.....	52
3.1 Construcción del cojinete.....	52

3.1.1	Base para el cojinete magnético	53
3.1.2	Carcasa para el cojinete magnético	53
3.1.3	Elaboración del eje tipo árbol.....	53
3.1.4	Ensamble funcional	54
3.2	Pruebas realizadas.....	54
3.3	Análisis de los resultados	61
3.3.1	Resultados obtenidos en la simulación a diferentes cargas y densidades	62
4.	Conclusiones y recomendaciones	64
4.1	Conclusiones.....	64
4.2	Recomendaciones.....	65
	Bibliografía	66
	Anexos.....	66

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de cojinete magnético vertical.....	10
Figura 2. Sistema de levitación magnética.	11
Figura 3. Cojinetes comerciales.	14
Figura 4. Principio básico de un cojinete magnético	15
Figura 5. Cojinete axial magnético.....	16
Figura 6. Sistema básico de un cojinete magnético.....	18
Figura 7. Sistema de levitación por repulsión.	21
Figura 8. Sistema de levitación por atracción.	21
Figura 9. Esquema de levitación	22
Figura 10. Tipos de imanes.	23
Figura 11. Materiales ferromagnéticos.	23
Figura 12. Imán convencional.....	24
Figura 13. Comportamiento del magnetismo.	25
Figura 14. Comportamiento del magnetismo.	26
Figura 15. Esquema del árbol recto.....	28
Figura 16. Esquema de árbol acodado.....	28
Figura 17. Árboles de sección constante.....	28
Figura 18. Árbol escalonado.....	29
Figura 19. Árbol con talladura.....	29
Figura 20. Secciones del árbol de transmisión	30
Figura 21. Experimento fuerza de atracción de imanes	35
Figura 22. Componentes de carcasa del cojinete	36
Figura 23. Eje del cojinete	37
Figura 24. Base del proyecto.....	37
Figura 25. Montaje sobre carcasas para pruebas de resistencia	38
Figura 26. Material ABS para fabricación de prototipo.....	39
Figura 27. Características térmicas de material ABS	39
Figura 28. Características térmicas y mecánicas de materiales empleados	40
Figura 29. Primera prueba con carga de 30N.....	41
Figura 30. Segunda simulación (A) para 100N de carga	43
Figura 31. Segunda simulación (B) para 100N de carga	44
Figura 32. Segunda simulación (C) para 100N de carga	45
Figura 33. Tercera simulación (A) para 300N de carga	46

Figura 34. Tercera simulación (B) para 300N de carga	47
Figura 35. Tercera simulación (C) para 300N de carga	48
Figura 36. Prueba de resistencias a torsión (A) bajo 25Nm.....	49
Figura 37. Prueba de resistencias a torsión (B) bajo 25Nm.....	50
Figura 38. Prueba de resistencias a torsión (C) bajo 25Nm.....	51
Figura 39. Cajones	54
Figura 40. Carcasa.....	55
Figura 41. Eje con muñón	55
Figura 42. Acople de la carcasa con muñón.....	56
Figura 43. Ajustes al diseño de carcasa	56
Figura 44. Montaje del eje en carcasas	57
Figura 45. Fabricación de nuevo eje.....	57
Figura 46. Montaje de carcasas y eje sobre la base	58
Figura 47. Fabricación de anillos en teflón	58
Figura 48. Anillos de teflón	59
Figura 49. Prueba de ensayo con pieza fabricada.....	59
Figura 50. Tacómetro	60
Figura 51. Prueba de ensayo destructivo	60

Lista de Tablas

Tabla 1. Rango de operación de materiales más usados como imanes permanentes....	25
Tabla 2. Prueba Contacto directo	32
Tabla 3. Prueba con carcasa de 1mm	33
Tabla 4. Prueba con carcasa de 7 mm	34
Tabla 5. Prueba con lámina ferromagnética de 1 mm.....	34
Tabla 6. Prueba con goma de 1 cm.....	35
Tabla 7. Resultados Simulación bajo una carga de 100N.....	62
Tabla 8. Resultados Simulación bajo una carga de 300N.....	62
Tabla 9. Resultados Simulación bajo una carga de 30N.....	63

Lista de anexos

Anexo A. Ficha técnica Imán W-05-N50-N.....	66
Anexo B. Plano eje con ranuras.....	71
Anexo C. Plano soporte de cojinetes.....	72
Anexo D. Plano ranura para imán.....	72

Glosario

Actuadores: también llamados accionadores, constituyen la interfaz entre las señales de control del dispositivo de control (por ejemplo, del autómeta) y el mismo proceso industrial. Se encargan de convertir las señales eléctricas de control en otro tipo de señales o en señales eléctricas de mayor potencia. Se distinguen tres tipos de actuadores según la fuente de energía con la que trabajan: eléctricos, neumáticos (aire) e hidráulicos (aceite) Brunete, San Segundo & Herrero (2020).

Agentes corrosivos: una sustancia **corrosiva** es una sustancia que puede destruir o dañar irreversiblemente otra superficie o sustancia con la cual entra en contacto.

Algoritmo de control: el control PID es un mecanismo de control que a través de un lazo de retroalimentación permite regular la velocidad, temperatura, presión y flujo entre otras variables de un proceso en general. El controlador PID calcula la diferencia entre nuestra variable real contra la variable deseada (García, 2013).

Coercitividad H_c : la coercitividad H_c define la intensidad del campo necesaria para volver a desmagnetizar completamente un imán. Dicho más fácil: cuanto mayor sea este número, tanto mejor mantendrá un imán su magnetización al ser expuesto a un campo magnético opuesto (IMA International, 2018)

Coercitividad iH_c : solamente cuando la intensidad del campo desmagnetizador alcanza el valor iH_c el imán pierde su polarización y con ella su magnetización completamente (IMA International, 2018).

Cojinetes magnéticos: tipo de rodamiento que soporta una carga mediante levitación magnética. Los cojinetes magnéticos soportan las velocidades mucho más altas que cualquier tipo de cojinete y no tienen una velocidad relativa máxima. (Arredondo, 2008).

Controlador: circuito eléctrico u otro componente electrónico utilizado para controlar otro circuito o componente.

Eje: barra metálica usualmente de forma cilíndrica, sólida o hueca que es usada para soportar componentes rotatorios o para transmitir potencia o movimiento por rotación o movimiento axial (Vélez, 2005).

Prototipo: primer ejemplar que se fabrica de un invento u otro producto, y que sirve de modelo para fabricar otras iguales, o molde original con el que se fabrica.

Remanencia magnética: la remanencia B_r es una medida para la inducción magnética o densidad de flujo que permanece en el imán tras su magnetización. Dicho más fácil: cuanto mayor sea este valor, más «fuerte» será el imán. Como unidad de medida para la inducción magnética o densidad de flujo se emplea el T (Tesla).

Rodamientos: los rodamientos magnéticos o suspensiones sin contacto se destacan por sus notables cualidades: no necesita lubricación, no hay partes que rocen, por lo tanto, no hay pérdidas por fricción, nivel de vibración extremadamente bajo, alta velocidad relativa, bajo consumo de energía, sistema de control y monitoreo automático de rodamientos (Espinosa, 2018).

Semiconductores: sirven como moduladores de transmisión eléctrica. Los semiconductores más comunes y empleados en la industria son: Silicio (Si) Germanio (Ge). Muchos minerales encontrados en la naturaleza son semiconductores tales como el Sulfuro de Zinc (ZnS), la Cuprita (Cu₂O) y la Galena (PbS), Los materiales semiconductores son los materiales más versátiles conocidos por el hombre. (Semiconductores, s.f.).

Sensores: permiten conocer el valor de las variables físicas adecuadas que participan en el proceso y convertirlas en señales eléctricas. El sensor transforma una acción, energía útil en datos eléctricos (Brunete, San Segundo & Herrero (2020).

Sistema de levitación: sistema electromecánico que consiste en una viga en desequilibrio, cuyo centro de gravedad se encuentra a una distancia r (Cruz, Gutierrez, Lozada & Luviano, 2017).

Introducción

La levitación magnética es el fenómeno por el cual un material con propiedades magnéticas puede levitar gracias a la repulsión existente entre dos polos iguales de dos imanes, o bien debido a lo que se conoce como Efecto Meissner. La levitación magnética se utiliza para suspender un objeto sin soporte alguno, sólo mediante la acción de campos magnéticos empleados para contrarrestar los efectos de la fuerza gravitacional (Martínez & Bedoya, 2013).

Los cojinetes magnéticos ocupan una línea de investigación y desarrollo, tanto en la parte académica como en la industrial, debido a las ventajas que proporcionan, en especial la ausencia de rozamiento (Arredondo, 2004). Por tanto, la falta de contacto también permite evitar todos los problemas procedentes del mismo, como el desgaste y el calentamiento. Esta habilidad hace que la levitación magnética sea ideal para su utilización en cojinetes magnéticos (Catamarca, 2014).

El principal beneficio para la utilización de la levitación magnética en ingeniería radica en que son sistemas sin fricción, por lo que no requieren lubricantes, y su costo de mantenimiento disminuye. Esta ausencia de contacto físico y la nula necesidad de lubricantes hace que esta tecnología sea ideal para trabajar en entornos industriales donde son necesarias atmósferas libres de polución, como por ejemplo la levitación de objetos en túneles de viento o la levitación en mesas anti- vibración en fabricantes de semiconductores (Catamarca, 2014).

El sistema de levitación propuesto para el presente estudio comprende un eje con libertad para rotar, el cual es estabilizado mediante imanes de neodimio. Un objetivo importante de control en este sistema es mantener el eje en una posición centrada y poder hacerlo rotar, con el fin de no tener ninguna limitación mecánica o de fricción (Perren, 2003).

Justificación

La levitación y los cojinetes magnéticos activos constituyen una línea de investigación en pleno desarrollo, tanto académica como industrialmente, debido a las ventajas que proporciona, en especial, la sustentación sin rozamiento. Al ser una tecnología de soporte sin contacto, la suspensión magnética hace posibles altas velocidades de rotación, no requiere lubricación y opera en un régimen de vibración del conjunto de la máquina, lo que proporciona una mayor longevidad de los componentes de los aparatos. Las características antes mencionadas hacen que los cojinetes magnéticos sean apropiados para máquinas y herramientas.

En investigaciones de ingeniería mecánica de la sede Tunja de la UAN en los últimos años se han diseñado y desplegado diferentes prototipos que utilizan cojinetes. De manera natural ha surgido el interés por estudiar y emplear cojinetes de levitación, que puedan desarrollarse con los recursos con que se cuenta.

Por tales razones, en este proyecto se pretende realizar el diseño, modelado e implementación de un sistema de levitación magnética de un grado de libertad, que consiste en una viga actuada por un cojinete magnético activo en configuración horizontal.

El **Objetivo general** de este trabajo es:

Desarrollar cojinetes de levitación magnética para usos de investigación.

Los **objetivos específicos** a alcanzar son:

1. Diseñar un prototipo de cojinetes mediante levitación magnética.
2. Construir el prototipo de cojinetes magnéticos y montar un eje de rotación sobre ellos.
3. Ensayar el prototipo con diferentes masas y en diferentes ambientes.
4. Modelar el sistema de levitación magnética.

Metodología

La metodología llevada a cabo para el desarrollo de la investigación contempla varias fases, entre las cuales se destacan la determinación de parámetros de los campos

magnéticos y requerimientos de estudios y cálculos donde se realizaron cinco pruebas de fuerza de sujeción con diferentes materiales. Para la construcción del prototipo del cojinete de levitación mediante imanes rectangulares de neodimio, en la primera fase se tomó la propiedad de repulsión que tienen los imanes de neodimio con la mayor remanencia, una muy alta coercividad y producto energético, tomando las especificaciones técnicas elementales y luego se procedió a realizar su diseño correspondiente. La segunda fase consistió en tomar los referentes del diseño para su construcción, la cual se hizo con selección de materiales, planos de dibujo mecánico, fabricación de sus partes, pruebas de ensayo y error, resultados de las pruebas y mejoras en caso de ser necesarias. En la tercera fase, con el diseño previo hecho, se procedió a la construcción de cojinetes magnéticos. La cuarta fase consistió en la realización de pruebas y ensayos para el cojinete.

Alcance

El proyecto comprende el diseño de un prototipo de cojinete magnético experimental que se diseñará y construirá para estudiar su baja fricción al rotar un eje y sus limitaciones ante diferentes masas montadas en el eje.

Resultados Esperados

Al culminar el proyecto, se espera contar con un prototipo de cojinetes de levitación magnética que le permita a un eje flotar entre ellos, para que de esta manera el eje pueda girar libremente, eliminando la fricción que se genera con cojinetes convencionales.

Ubicación dentro de las líneas de trabajo del programa

En la formación de ingenieros en la Universidad Antonio Nariño se incluyen diversas materias que involucran conceptos que se relacionan directamente con el proyecto. Este trabajo se realizó sobre la línea de investigación “Tecnologías para el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables”.

Usuarios directos y formas de utilización de los resultados del proyecto

La culminación de este proyecto y su respectivo prototipo está destinado a apoyar investigaciones por parte de la comunidad educativa de la Universidad Antonio Nariño.

1. Marco Teórico

1.1 Estado del arte

En este apartado se hace una descripción de antecedentes sobre el tema, por lo cual se mencionan algunas investigaciones y estudios pertinentes sobre los cojinetes magnéticos y el sistema de levitación con el fin de tener referentes teóricos para abordar la presente investigación.

En primera instancia se presenta la investigación de Ferreiro, Haro, Pérez, Piñón y Calvo (s.f.) quienes realizaron el proyecto denominado “Diagnosis de Cojinetes Magnéticos Activos”. Este artículo trata sobre un diagnóstico llevado a cabo sobre cojinetes magnéticos activos (CMA) con base en técnicas de redundancia analítica; partiendo de la hipótesis que los fallos que afectan a los CMA tienen su origen en uno o varios de los siguientes elementos: circuitería de las bobinas, sensores de posición o rotor de la máquina debidos a perturbaciones mecánicas y/o magnéticas, la corriente a las bobinas es una variable que puede ser medida con fiabilidad y determinada analíticamente de manera simultánea con base en modelos electromagnéticos bien establecidos. Para diagnosticar el sistema controlado utilizando redundancia analítica mediante aproximaciones a espacios de paridad, fue necesario hallar suficientes relaciones analíticas a partir de la teoría del electromagnetismo, para formular y predecir fallos en los sensores de posición radial y axial y/o condiciones de operación anormales. Para tal efecto se introdujeron dos fuerzas de excitación para analizar sus efectos sobre los CMA de cara a su detección con base en la redundancia analítica. También Se ha utilizado el dominio temporal para comparar los desvíos entre diferentes respuestas. En primer lugar, se introduce una fuerza con perfil de escalón, la cual sirva para estudiar de las fuerzas radiales originadas por el impulsor o turbina acoplada al rotor suspendido, y, en segundo lugar, se introduce una fuerza de excitación oscilante de alta frecuencia para emular el efecto de las vibraciones radiales.

El artículo concluye con la propuesta de varias soluciones basadas en redundancia analítica partiendo del conocimiento de los modelos fundamentales del electromagnetismo y se probaron por simulación. Los casos simulados prueban que la relación entre corrientes y entrehierro para una bobina activa puede ser asociada a la carga mecánica sobre el rotor. Además, en ausencia de ruido excesivo del exterior, la corriente inversa puede ser contrastada con el entrehierro para detectar vibraciones mecánicas procedentes de desequilibrios dinámicos del rotor.

Por otro lado, Liaño (2016) en su proyecto “Diseño y comportamiento de cojinetes” explica el concepto de cojinete y los diferentes tipos existentes. Primero se realiza una introducción a la lubricación centrándose en la lubricación hidrodinámica para entender el principio de funcionamiento de un cojinete. También se analiza el comportamiento de un cojinete hidrodinámico (más usado en los buques: cojinete de empuje, etc.) Por último, se exponen los criterios generales para el diseño de cojinetes (aspectos prácticos, materiales, etc.) así como el proceso de diseño relacionando las variables del mismo. El estudio concluye que los rodamientos tienen mayor capacidad de carga que los cojinetes de fricción simples e hidrostáticos cuando aumenta la velocidad de giro. Los cojinetes de fricción simples y los hidrostáticos pueden soportar cargas similares a los rodamientos a bajas velocidades de giro, y que los cojinetes hidrodinámicos soportan mayores cargas que los rodamientos (a igual tamaño), a partir de velocidades de giro en las que se pueda mantener la película lubricante. En determinadas situaciones operativas, la elección del cojinete puede basarse en parámetros distintos a la capacidad de carga; así mismo en el caso más básico de un cojinete que soporta una carga transversal, las condiciones de funcionamiento son la carga radial y la velocidad de giro del eje.

En cuanto al diseño, se menciona que el mecanismo de cálculo propuesto está basado en la utilización del método de perturbación regular (perturbación de p y S) para aproximar la solución de la ecuación de Reynolds en cojinetes relativamente cortos (longitud finita), tomando como parámetro de perturbación la relación $(L/D)^2$. Teniendo en cuenta que la tendencia actual en el diseño de cojinetes se encamina hacia cojinetes más bien cortos y por ello más cargados (es decir, con mayor excentricidad o menor número de Sommerfeld), la solución de Ocvirk de la ecuación de Reynolds está limitada para el cálculo de cojinetes poco cargados. Comparando los resultados obtenidos mediante el método propuesto y la solución de Ocvirk se obtiene que el método propuesto no aporta mejoras sensibles en el

cálculo de las variables del sistema: perfiles de presión, tensión de corte y velocidades. También que el método propuesto mejora la predicción de los parámetros de funcionamiento que dependen de la variación de la presión con la coordenada Θ : capacidad portante y coeficiente de fricción. Además, las predicciones de estos parámetros son muy buenas aún para relaciones L/D cercanas a 1 y excentricidades relativas de $\frac{1}{2}$. Por último, se afirma que la solución de Ocvirk arroja mejores resultados para el parámetro de funcionamiento que depende de la variación de la presión con la coordenada z : caudal de suministro (sobre todo considerando la notable sencillez con que puede calcularse).

Otro estudio titulado “Modelado y control de un sistema de levitación magnética basado en un cojinete magnético activo” realizado por Cruz, Gutiérrez, Lozada y Luviano (2017) presenta el diseño, modelado e implementación de un sistema de levitación magnética de un grado de libertad, que consiste en una viga actuada por un cojinete magnético activo en configuración pendular. Se obtiene su representación en espacio de estado y, tras una linealización tangente, su función de transferencia correspondiente. Se describen las características del dispositivo experimental, su instrumentación electrónica y mecanismo, particularmente el procedimiento de diseño del actuador electromagnético empleado, así como su caracterización para determinar la constante de proporcionalidad de la fuerza electromagnética. Por otra parte, se presenta la simulación e implementación de un controlador tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) para observar su funcionamiento, así como uno de tipo Proporcional Integral (PI) permitiendo que se realice una estabilización adecuada en la posición de equilibrio de la viga, verificándose bajo diferentes pruebas, incluyendo perturbación externa. Finalmente, se muestra la simulación numérica e implementación experimental de esquemas clásicos de control para estabilizar en el punto de equilibrio del sistema, donde la principal contribución del trabajo consiste en el sistema que puede funcionar como banco de pruebas para la implementación de diferentes estrategias de control. Se plantea a futuro diseñar e implementar estrategias de control y estimación de estado para este sistema, considerando la dinámica no lineal, así como las saturaciones naturales de la entrada de control.

En el proyecto “Diseño y construcción de un levitador magnético” de Sánchez (2018) se diseña un dispositivo con énfasis en el control, que se implementa en un microcontrolador Raspberry Pi a través del entorno de Matlab/Simulink. Los objetivos que pretende este

proyecto son la elaboración de un modelado preciso de la planta, el diseño de un simulador en el entorno de Matlab/Simulink que permita obtener una respuesta del sistema lo más parecida posible a la respuesta real; el diseño de un control que permita fijar la posición vertical de un objeto y la construcción del levitador, junto con el ensamblaje de todos los elementos requeridos para su funcionamiento. Los resultados de este proyecto muestran que se construyó un prototipo funcional, que se puede utilizar para implantar controles en el futuro. Asimismo, se diseñó satisfactoriamente un simulador en el entorno de Matlab/Simulink. Se realizó un modelado de la planta, que junto con los respectivos ensayos supone un mayor entendimiento sobre el fenómeno de la levitación magnética. Cabe mencionar que, pese a los resultados satisfactorios, el control implementado no fue capaz de controlar la posición de la carga prevista debido a la enorme influencia del ruido en la medida de la corriente.

En cuanto a las posibles líneas futuras de investigación se teoriza sobre la posibilidad de incorporar actuadores adicionales en direcciones perpendiculares de cara a controlar la posición de forma tridimensional. También se podrían optimizar algunos aspectos del modelo actual del levitador incorporando mejores materiales o sensores de mayor rango.

A nivel nacional, Martínez y Bedoya (2013) tratan el tema en el artículo titulado “Un Nuevo Modelo Basado en Funciones Exponenciales para un Sistema de Levitación Magnética Uniaxial”, el cual se desarrolla a partir de principios magnetostáticos. El sistema en mención está compuesto por dos bobinas, utilizadas como actuadores para el control de posición de dos imanes permanentes que deben deslizarse a través de un eje vertical, esta es una configuración muy utilizada en motores con suspensión magnética y en general por cualquier sistema con cojinetes o soportes magnéticos activos. Basados en el modelo amperiano y la ley de Biot-Savart para este sistema, se establecieron mediante cálculos numéricos las relaciones fuerza– distancia entre bobinas e imanes permanentes y entre ambos imanes. Con estas relaciones numéricamente definidas se realizaron ajustes de curva exponenciales para obtener el modelo dinámico no lineal del sistema de suspensión magnética. En este artículo adicionalmente se presenta un modelo linealizado generado a partir del modelo obtenido previamente, demostrando que éste representa correctamente la dinámica del sistema cerca al punto de operación. En este trabajo se obtiene el modelo no lineal y lineal de una planta de levitación magnética MIMO uniaxial, luego de elegir de entre tres posibles geometrías para las bobinas y magnetos se seleccionó aquella que

coincide con la utilizada en el posicionamiento axial de rotores dado a que las fuerzas que modelan el sistema tienen un comportamiento exponencial con respecto a la distancia mejor que las otras configuraciones. Las fuerzas mencionadas fueron calculadas numéricamente y existe concordancia entre los resultados para las configuraciones 1, 2 y 3 con los expuestos en la literatura, lo cual valida nuestros resultados. Las dimensiones de los magnetos para la configuración 1 elegida son: 0,0508 m \times 0,0127 m \times 0,00635 m (diámetro externo por diámetro interno por altura) y las dimensiones de las bobinas: 0,0508 m \times 0,0127 m \times 0,05 m (diámetro externo por diámetro interno por altura). Igualmente, para los cálculos numéricos mencionados se seleccionó para la densidad de corriente conductores con área transversal igual a $8,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2$. Para la configuración número 1, se halló el modelo no lineal del sistema de levitación mediante los ajustes de curva exponencial, para las fuerzas entre bobina e imán y entre imán e imán. Se demostró que el sistema lineal representa la dinámica del sistema no lineal, debido a que el sistema evaluado en el punto de operación seleccionado indica que el punto de equilibrio es hiperbólico.

1.2 Reseña histórica del Magnetismo

Los fenómenos magnéticos fueron conocidos por los antiguos griegos. Se dice que por primera vez se observaron en la ciudad de Magnesia del Meandro en Asia Menor, de ahí el término magnetismo. Sabían que ciertas piedras atraían el hierro, y que los trocitos de hierro atraídos atraían a su vez a otros. Estas se denominaron imanes naturales. El primer filósofo que estudió el fenómeno del magnetismo fue Tales de Mileto, filósofo griego que vivió entre 625 a. C. y 545 a. C. En China, la primera referencia a este fenómeno se encuentra en un manuscrito del siglo IV a. C. titulado “Libro del Amo del Valle del Diablo”: ¿La magnetita atrae al hierro hacia sí o es atraída por éste? La primera mención sobre la atracción de una aguja aparece en un trabajo realizado entre los años 20 y 100 de nuestra era: “La magnetita atrae a la aguja”. (Herrera, 1979)

En 1600, el médico y físico William Gilbert publicó en Londres su obra sobre el imán y los cuerpos magnéticos y sobre el gran imán la Tierra denominado “De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure” (Sobre los imanes, los cuerpos magnéticos y el gran imán terrestre); conocido como “De magnete”, que estableció las

bases del estudio profundo del magnetismo consignando las características y tipologías de los imanes y realizando experimentos cuidadosamente descritos (Química.es, s. f.)

Ya en 1820, el físico y químico danés Hans Christian Oersted descubrió la relación entre la electricidad y el magnetismo en un experimento que llevó a cabo ante sus alumnos. Demostró empíricamente que un hilo conductor de corriente podía mover la aguja imantada de una brújula. Podía, haber interacción entre las fuerzas eléctricas y las fuerzas magnéticas, lo que para la época resultó revolucionario. (Museo virtual de la ciencia, s. f.)

1.3 Levitación Magnética

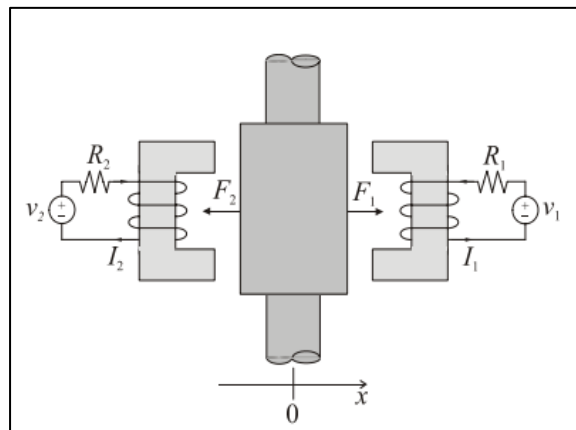
Según Perren (2003), “levitación magnética es el fenómeno por el cual un material dado puede, literalmente, levitar gracias a la repulsión existente entre los polos iguales de dos imanes, que se consigue mediante la interacción de campos magnéticos que dan lugar a fuerzas de atracción o repulsión, dependiendo del diseño. En otras palabras, la presión magnética se contrapone a la gravedad”. Cabe decir que cualquier objeto puede ser levitado, siempre y cuando el campo magnético sea lo suficientemente fuerte.

La superconductividad es una característica de algunos compuestos, los cuales, por debajo de cierta temperatura crítica, no oponen resistencia al paso de la corriente; es decir: son materiales que pueden alcanzar una resistencia nula. En estas condiciones de temperatura no solamente son capaces de transportar energía eléctrica sin ningún tipo de pérdidas, sino que además poseen la propiedad de rechazar las líneas de un campo magnético aplicado. Se denomina “Efecto Meissner” a esta capacidad de los superconductores de rechazar un campo magnético que intente penetrar en su interior; de manera que, si se acerca un imán a un superconductor, se genera una fuerza magnética de repulsión la cual es capaz de contrarrestar el peso del imán produciendo así la levitación. Una forma de eliminar las pérdidas por fricción producidas durante la rotación de una máquina eléctrica es reemplazar el rodamiento convencional por uno que trabaje con el principio de la levitación magnética.

Los rodamientos magnéticos o suspensiones sin contacto se destacan por sus notables cualidades: no necesita lubricación, no hay partes que rocen, por lo tanto, no hay pérdidas por fricción, nivel de vibración extremadamente bajo, alta velocidad relativa, bajo consumo

de energía, sistema de control y monitoreo automático de rodamientos (ver Figura 1). Todas estas ventajas hacen que los cojinetes magnéticos sean las mejores soluciones en muchas aplicaciones: para turbinas de gas, para equipos criogénicos, en generadores eléctricos de alta velocidad, para dispositivos de vacío, para diversas máquinas herramienta y otros equipos, incluyendo alta precisión y velocidad (alrededor de 100.000 rpm), donde es importante la ausencia de pérdidas mecánicas, interferencias y errores (Espinosa, 2018).

Figura 1. Esquema de cojinete magnético vertical.

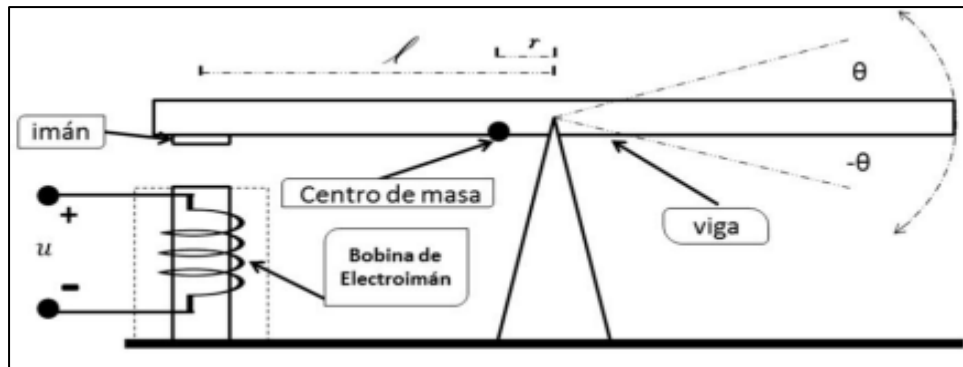


Fuente: Sánchez (2018).

En principio, los rodamientos magnéticos se clasifican en dos tipos: pasivos y activos. Se fabrican cojinetes magnéticos pasivos, pero este enfoque está lejos de ser ideal, por lo que rara vez se utiliza. Se abren posibilidades técnicas más flexibles y amplias con los rodamientos activos, en los que se crea un campo magnético mediante corrientes alternas en los devanados del núcleo.

Por otro lado, Cruz, Gutierrez, Lozada & Luviano (2017) definen el sistema de levitación magnética como un sistema electromecánico que consiste en una viga en desequilibrio, cuyo centro de gravedad se encuentra a una distancia r . Asimismo, el dispositivo cuenta con un imán permanente de neodimio a una distancia l con respecto al pivote de la viga, además de un electroimán que tiene la función de actuador del sistema (Figura 2).

Figura 2. Sistema de levitación magnética.



Fuente: Cruz et al. (2017).

El modelo no lineal es una variante de los sistemas propuestos en Lindlau (2002) y Mahindrakar (2007), citados por Cruz et. al. (2017) y sus ecuaciones diferenciales pueden ser obtenidas de las ecuaciones de Euler-Lagrange y las Leyes de Kirchoff, definidas de la siguiente manera:

$$\frac{d^2\theta}{dt} = \frac{1}{j} C_e \frac{i^2}{(l \sin \theta)^2} - \frac{mgr \cos \theta}{j}$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}u$$

Donde:

- θ : ángulo de la viga con la horizontal;
- i : corriente eléctrica que circula por la bobina del electroimán;
- m, J : parámetros correspondientes a la masa y momento de inercia de la viga respectivamente;
- l : distancia entre el pivote y el centro del imán permanente;
- r : distancia radial del centro de masa de la viga al centro de rotación;
- g : constante de gravedad;
- C : constante de proporcionalidad de la fuerza electromagnética;
- R, L : resistencia y la inductancia de la bobina del subsistema electromagnético, respectivamente;

– u : entrada de voltaje aplicada al sistema electromagnético.

$x = (x_1, x_2, x_3)^T$ es el vector de estado correspondiente. El sistema no lineal en variables de estado es expresado de la siguiente forma:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{c_e}{J} \left(\frac{x_3}{l \sin x_1} \right)^2 - \frac{mgr \cos x_1}{J}$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{Rx_3}{L} + \frac{u}{L}$$

Para obtener el punto de equilibrio en la levitación del eje tiene que cumplirse que:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = \frac{dx_3}{dt} = 0,$$

Luego se tiene:

$$\frac{dx_1}{dt} = 0, \text{ implica que } x_2 = 0 \text{ y } x_1 = X \text{ y } X \text{ un valor real}$$

$$\frac{dx_2}{dt} = 0, \quad \frac{dx_2}{dt} = \frac{c_e}{J} \left(\frac{x_3}{l \sin x_1} \right)^2 - \frac{mgr \cos x_1}{J} = 0 \rightarrow \left(\frac{x_3}{l \sin x_1} \right)^2 = \frac{mgr \cos x_1}{C_e}$$

$$x_3 = \sqrt{\frac{mgr \cos x_1}{C_e}} l \sin x_1 \rightarrow x_3 = \sqrt{\frac{(mgr \cos x_1)(l \sin x_1)^2}{C_e}}$$

Considerando la naturaleza de x_1 se reescribe

$$x_3 = \sqrt{\frac{(mgr \cos X)(l \sin X)^2}{C_e}}$$

$$\frac{dx_3}{dt} = 0$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{Rx_3}{L} + \frac{u}{L} = 0 \rightarrow \frac{u}{L} = \frac{Rx_3}{L} \rightarrow u = Rx_3$$

Considerando:

$$x_3, u = R \sqrt{\frac{(mgr \cos X)(l \sin X)^2}{C_e}}$$

Finalmente, el punto de equilibrio está dado por:

$$X = (X_1, X_2, X_3) = (X, 0, \sqrt{(mgr \cos X)(l \sin X)^2 / C_e})$$

Se puede calcular la entrada de control u en estado permanente para mantener la viga en la posición deseada x_1 de la siguiente manera:

$$U = R \sqrt{\frac{(mgr \cos X)(l \sin X)^2}{C_e}}$$

1.4 Cojinetes

En un cojinete por rodadura o deslizamiento el eje se desliza en un huelgo, separado por una más o menos buena película de lubricante. En un cojinete con elementos rodantes el anillo o aro interior rueda sobre elementos rodantes, que se mueven sobre el anillo exterior. Bajo las mismas condiciones de carga, la fricción en un rodamiento por deslizamiento es mucho mayor que en un rodamiento con elementos rodantes. La fricción de un cojinete deslizante varía con la velocidad de rotación, pero es prácticamente constante para un cojinete con elementos rodantes (Figura 3).

Figura 3. Cojinetes comerciales.



Fuente: López (2004).

En la actualidad cualquier maquinaria o mecanismo, sea simple o complejo, está conformado por elementos o piezas unidos entre sí de forma fija o moviéndose unos respecto a otros. Entre las partes móviles se encuentran ejes y árboles, que necesariamente van apoyados y necesitan de una superficie que los pueda sostener. Al existir un movimiento relativo entre el eje y la superficie de apoyo, se producen fuerzas de rozamiento o fricción que ocasionan pérdidas mecánicas o de energía.

Entre los atributos de los cojinetes están:

- Son puntos de apoyo de los ejes rotativos.
- Sirven para sostener su peso (ejes rotativos).
- Guían la rotación.
- Evitan deslizamientos.
- En algunas ocasiones van montados directamente en el marco o bastidores de las máquinas, en otras van montados en soportes especialmente diseñados para facilitar el montaje.

Los cojinetes son piezas de acero aleado con cromo, manganeso y molibdeno, para facilitar la ejecución de rigurosos tratamientos térmicos y obtener piezas de gran resistencia al desgaste y a la fatiga. Hay dos maneras de trabajar este problema: la primera sería colocar lubricante entre las superficies en contacto y la segunda la implementación de cojinetes. “El término “cojinete” típicamente se refiere a superficies de contacto a través de las cuales se transmite una carga, los cojinetes se definen como elementos de

máquinas que simultáneamente permiten a un eje girar libremente y soportar carga”. (Liaño, 2016) Estos son puntos de apoyo de ejes y árboles para apoyar su peso y permitirles girar en sus movimientos reduciendo significativamente las pérdidas de energía por fricción y el desgaste entre las superficies en contacto con ese movimiento relativo.

1.4.1 Tipos de cojinetes

Existen dos tipos de cojinetes:

- 1) De rodamiento o antifricción: existen terceras piezas (bolas, rodillos, etc.) que son las que tienen el deslizamiento por rodadura.
- 2) De deslizamiento: el eje giratorio tiene movimiento sobre los soportes.

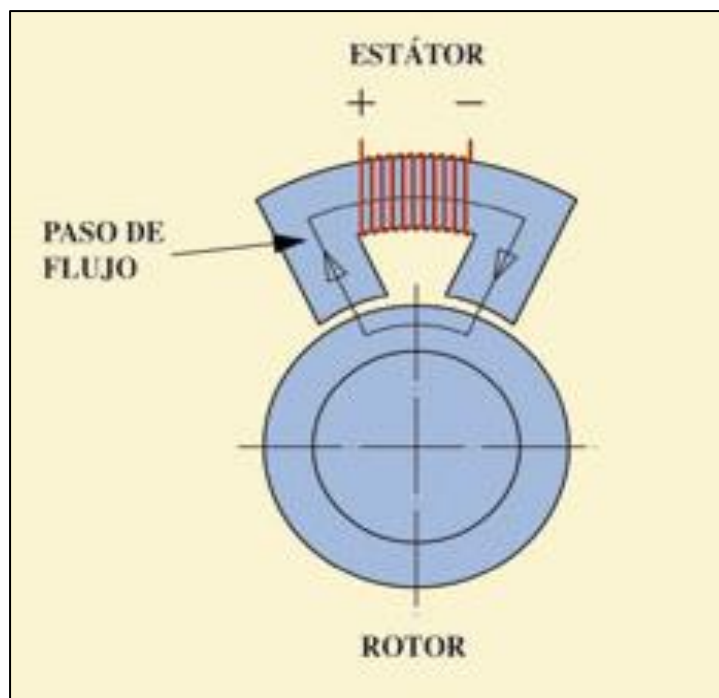
▪ **Cojinetes Magnéticos.**

Un cojinete magnético es un tipo de rodamiento que soporta una carga mediante levitación magnética. Estos soportan piezas móviles sin contacto físico. Por ejemplo, pueden hacer que un eje giratorio levite y permita un movimiento relativo con una fricción muy baja o casi nula y sin desgaste mecánico. Los cojinetes magnéticos soportan las velocidades mucho más altas que cualquier tipo de cojinete y no tienen una velocidad relativa máxima. Sin embargo, los cojinetes magnéticos tienen desventajas como el hecho de ser inestables y menos amortiguados que los cojinetes convencionales. (Arredondo, 2008).

El sistema básico de un cojinete magnético radial, en algunos aspectos es similar al de un motor eléctrico. Las diferencias aparecen cuando se consideran sus tres partes principales: Actuadores, Sensores, Controlador y algoritmos de control (ver Figura 4).

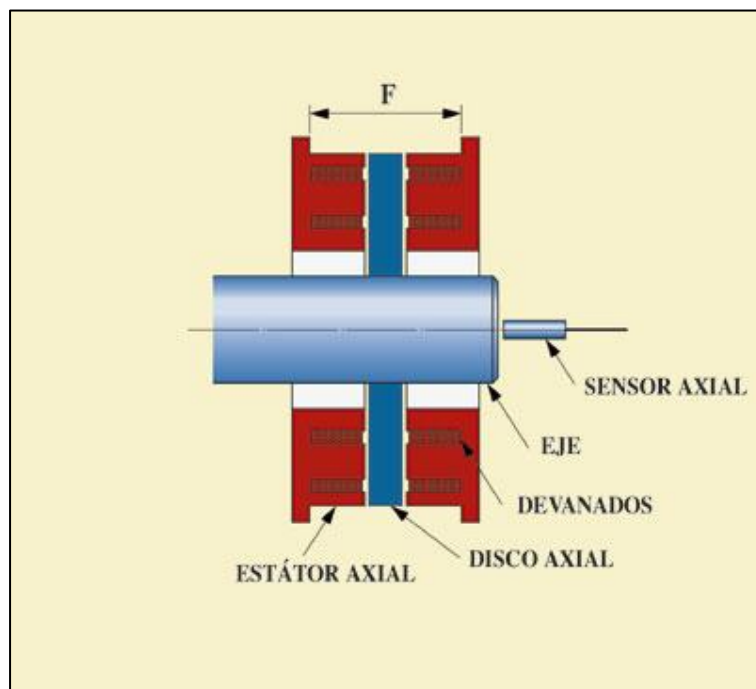
En lugar de generar un par, esta disposición produce una fuerza de atracción para hacer levitar un eje. Un estator radial típico consiste en un núcleo de hierro laminado con bobinas de cobre, creando una serie de polos norte y sur alrededor del eje. Cuando se imanar (activan) las bobinas se transforman en electroimanes que producen una fuerza de atracción que actúa sobre un eje ferromagnético (laminado o macizo). El intersticio de aire radial entre el estator y el eje suele ser de 0,5 mm a 2 mm. A diferencia de los cojinetes radiales, un cojinete axial magnético tiene un disco ferromagnético sólido fijado al eje, con un electroimán en uno o ambos lados (ver Figura 5).

Figura 4. Principio básico de un cojinete magnético.



Fuente: Interempresas (2006).

Figura 5. Cojinete axial magnético.



Fuente: Interempresas (2006).

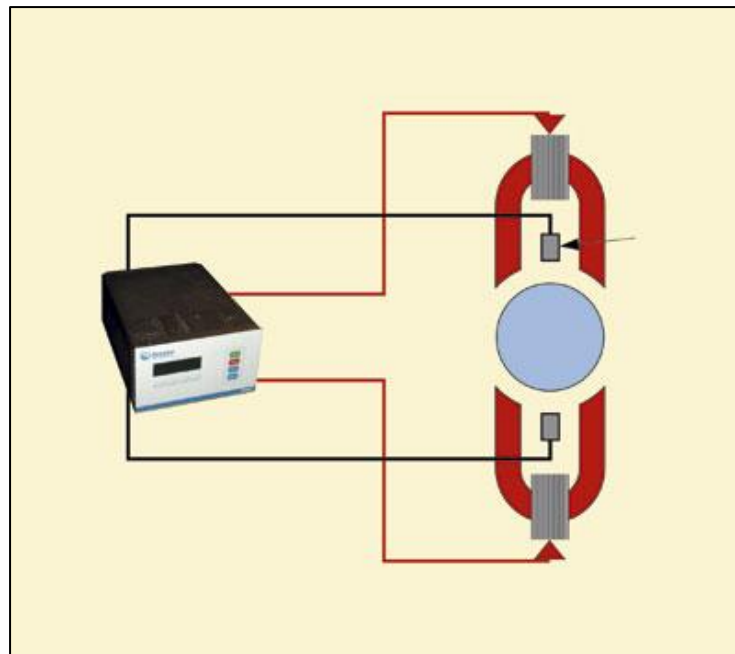
Una tercera disposición es el cojinete magnético cónico. Éste combina la característica de un cojinete radial y un cojinete axial. Los cojinetes cónicos controlan satisfactoriamente tanto el movimiento radial como el axial en máquinas que cuentan sólo con una carga axial modesta. Al eliminar la necesidad de cojinetes axiales individuales, se puede reducir la longitud global de la máquina.

En todos los tipos de cojinetes, el posicionamiento del eje se consigue mediante una disposición de sensores inductores en cinco ejes (cuatro radiales y uno axial). Las señales de los sensores pasan al controlador que mide las posiciones del eje y regula la corriente enviada a los actuadores del cojinete mediante avanzados algoritmos de control.

El hardware del controlador comprende tres partes principales: la electrónica del procesador de la señal digital (DSP), el suministro eléctrico y los amplificadores. La electrónica del DSP proporciona el “cerebro” detrás del cojinete magnético. Unos algoritmos de control avanzados miden la posición del eje y regulan la corriente enviada a los actuadores 10.000 veces por segundo. Utilizando un PC y un software SKF denominado MBScope, se pueden modificar y guardar en un archivo los parámetros de sintonización específicos de la máquina. Este software también le permite al usuario monitorizar el rendimiento del cojinete y del eje, analizando parámetros como la vibración, el equilibrado y la velocidad, etc. El suministro eléctrico convierte la corriente CA a una corriente CC utilizada por los amplificadores del cojinete. Cuanto mayor sea el amplificador, mayor será la corriente eléctrica requerida. Los amplificadores regulan la corriente enviada a los cojinetes según los puntos fijados por la electrónica del DSP. El tamaño de los amplificadores varía según las necesidades de la máquina, cuanto mayor sea la máquina, mayor serán los amplificadores (Interempresas, 2006).

Existe una gama de controladores con distintas salidas de electricidad (corriente y voltaje) para ajustarse al rendimiento requerido de cada máquina (Figura 6).

Figura 6. Sistema básico de un cojinete magnético.



Fuente: Interempresas (2006).

Los cojinetes magnéticos funcionan sin lubricante. Esto los hace especialmente apropiados para máquinas que funcionan en entornos de vacío, con altas o bajas (criogénicas) temperaturas, o con agentes corrosivos. De hecho, cualquier máquina o proceso, que no tolere la contaminación de los lubricantes o las partículas de desgaste supone un objetivo para los cojinetes magnéticos. Dos ejemplos típicos son la industria de los equipos para semiconductores y las compañías de alimentación y bebidas. Una operación libre de lubricación significa que ya no se requieren los equipos relacionados con la lubricación, como las bombas y los filtros. Esto supone una reducción considerable de los costes totales de propiedad.

Otra característica de los cojinetes magnéticos es la baja pérdida de rotación del eje. Esto permite reducir la potencia del motor y lograr mayores eficiencias. Una baja pérdida, significa que las temperaturas de funcionamiento son generalmente más bajas que con otros rodamientos, como los de elementos rodantes o los cojinetes hidrodinámicos. Esto reduce la necesidad de utilizar equipos de refrigeración.

Asimismo, los cojinetes magnéticos funcionan con un intersticio de aire controlado, que incluso puede ser una ventaja. En algunos procesos se requiere que un líquido o material pase por el cojinete. El intersticio de aire hace que esto sea posible. Las aplicaciones biológicas y farmacéuticas relacionadas con el procesamiento de células son sólo dos ejemplos. También es posible obturar herméticamente a los cojinetes magnéticos, lo que los hace atractivos para los procesos que manejen fluidos corrosivos que, de lo contrario, atacarían al devanado o las laminaciones. Asimismo, se pueden sumergir bajo presión en los fluidos de los procesos sin la necesidad de obturaciones. Esto los hace extremadamente útiles en procesos sensibles como los de la industria alimentaria.

En comparación con los rodamientos de elementos rodantes o los cojinetes hidrodinámicos, los cojinetes magnéticos permiten velocidades periféricas mucho más altas. Se pueden lograr velocidades de hasta 250 m/s o alrededor de 4,5 millones “n x d” (velocidad de giro en min⁻¹ y diámetro en mm). Con tantos beneficios, los cojinetes magnéticos ahora suponen una opción extremadamente atractiva para muchas aplicaciones que no se consideraban anteriormente. (Interempresas, 2006)

Por otro lado Ferreiro, Haro, Pérez, Piñón y Calvo (s.f) señalan que la aplicación de Cojinetes Magnéticos Activos (CMA) se funda en el principio por el que un electroimán atrae material ferromagnético, partiendo de que la tendencia natural del estator de la máquina en cuestión es atraer al rotor hasta que entran en contacto mecánico, se requiere una acción enérgica de control que compense este efecto por medio de la modulación del campo magnético de los electroimanes hacia la posición radial central y afirman que el tipo más común de control consiste en la realimentación de la posición radial del eje. Así las cosas, cada sistema de CMA consiste en un grupo de electroimanes actuadores, un conjunto de sensores de posición radial y axial del rotor respecto al estator, un sistema realimentado de control y amplificadores de potencia. Los electroimanes actuadores y los sensores se hallan ubicados en la máquina, mientras que los amplificadores y el sistema de control se hallan remotamente instalados fuera de la misma.

Un cojinete magnético activo o concretamente un CMA comprende un conjunto de electroimanes radialmente ubicados en torno a un rotor formado por un anillo de láminas ferromagnéticas. Los pares de electroimanes están posicionados en oposición entre sí. Por ejemplo, en un CMA de cuatro electroimanes existe un par de electroimanes en

oposición para cada eje formando ángulo de 90 grados de arco o perpendiculares entre sí. Cada electroimán consiste en un núcleo laminado y una o dos bobinas. (Ferreiro et. al., s.f.)

En la última década se han llevado a cabo estudios intensivos y exhaustivos para desarrollar CMA exentos de sensores de posición. Entre todos ellos ha sido pionero Vischer (1993), citado por (Ferreiro et. al., s.f.), quien presenta un sistema de levitación magnética que combina todas las ventajas conocidas de los CMA en una configuración sin sensores de posición. El método consigue la levitación en modo estable y amortiguado sin sensores de posición. Esta característica se ha conseguido utilizando el voltaje de las bobinas como entrada al sistema (tensión en lugar de amplificadores de corriente) y la corriente como salida del sistema. El resultado es un sistema observable y controlable en teoría de control, capaz de ser estabilizado con un compensador lineal utilizando solamente la medida de corriente de alimentación a los electroimanes.

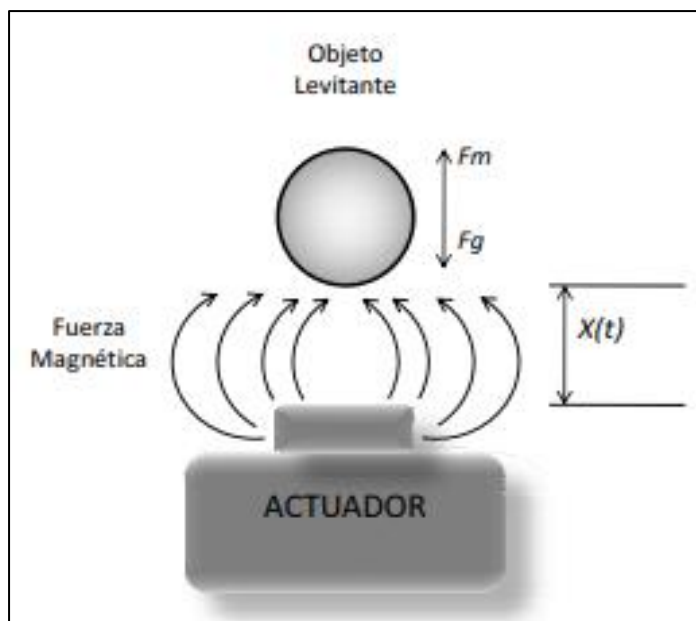
1.5 Principios de Levitación

Se pueden encontrar dos principios básicos, principio de levitación por atracción y principio de levitación por repulsión, donde el primero resulta muy atractivo para la presente investigación, por su no linealidad e inestabilidad.

1.5.1 Principio de Levitación por repulsión

Las corrientes inducidas en el cuerpo conductor generan las fuerzas de levitación. Este sistema es estable en su eje vertical y tiene un punto de equilibrio natural (Figura 7)

Figura 7. Sistema de levitación por repulsión.

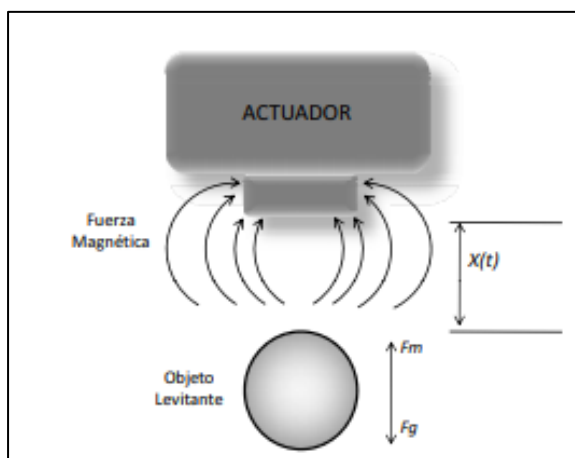


Fuente: Hernández (2008).

1.5.2 Principio de Levitación por atracción

Se da cuando un cuerpo es atraído por un flujo magnético en contra de la gravedad. El equilibrio se produce cuando la fuerza de atracción y de la gravedad es inestable, por lo que la levitación por atracción es prácticamente imposible sin la ayuda de un sistema de control (Figura 8)

Figura 8. Sistema de levitación por atracción.

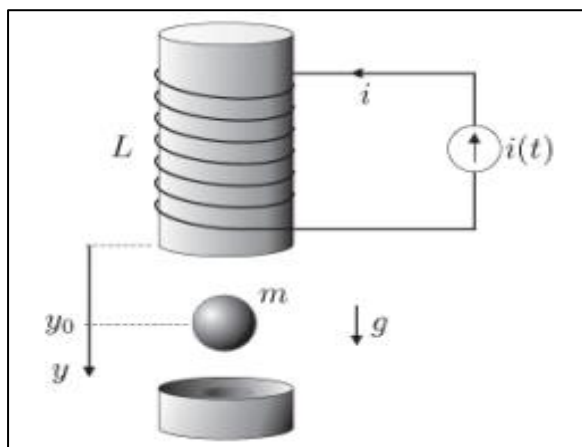


Fuente: Hernández (2008).

- **Levitador magnético**

Un levitador magnético es un dispositivo con la capacidad de mantener una carga magnética en suspensión en un rango de alturas determinado. El funcionamiento del levitador es: se le aplica tensión a un electroimán, apareciendo una corriente, esta corriente genera un campo magnético y este campo provoca una fuerza vertical en la carga que contrarresta su peso. A partir de un control en lazo cerrado se puede generar la tensión adecuada en cada momento para que la carga se mantenga en una posición determinada (ver Figura 9).

Figura 9. Esquema de levitación.



Fuente: Sánchez Bas, P. (2018).

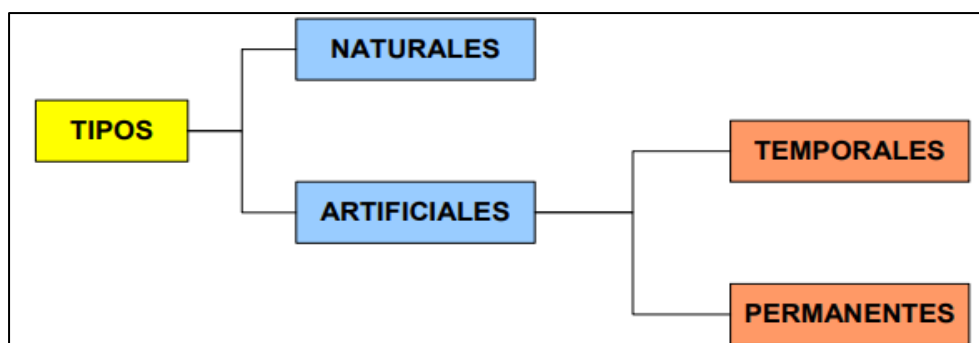
1.6 Magnetismo e Imanes

El magnetismo es la rama de la Física que trata de explicar los fenómenos de atracción y repulsión entre imanes o la atracción que estos ejercen sobre el hierro, el níquel y el cobalto. Estos materiales susceptibles de ser atraídos por un imán son los denominados materiales ferromagnéticos.

Los imanes son materiales que atraen el hierro, al níquel o al cobalto, y a algunas de sus aleaciones, siempre que se encuentren dentro del área de influencia, denominada “campo magnético”. Cada imán tiene dos polos magnéticos, denominados, polo norte y polo sur,

de manera que polos iguales se repelen y los polos contrarios se atraen. Los imanes pueden ser naturales, como la magnetita (Fe_3O_4), un óxido de hierro que da nombre al fenómeno, o también pueden ser artificiales. Estos últimos pueden ser permanentes o temporales (Leira & Gómez, 2018), ver Figura 10.

Figura 10. Tipos de imanes.

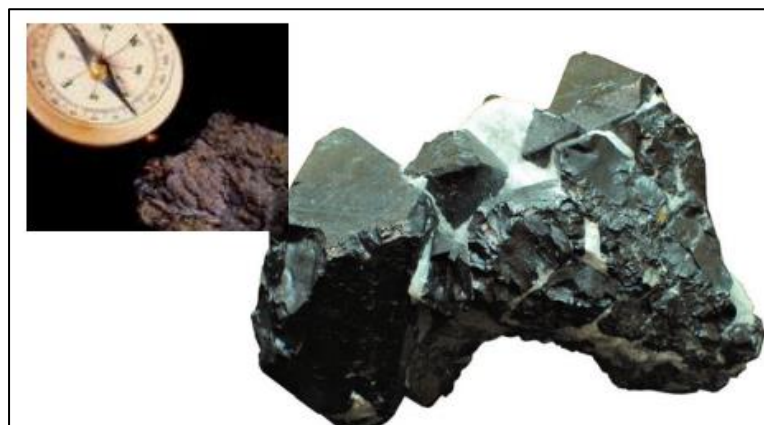


Fuente: López (2004).

1.6.1 Imanes Naturales

Son cuerpos que se encuentran en la naturaleza y que tienen propiedades magnéticas. El mineral más común de los imanes naturales es la magnetita: óxido ferroso-diférrico (Fe_3O_4), mineral de color negro y brillo metálico (Figura 11).

Figura 11. Materiales ferromagnéticos.

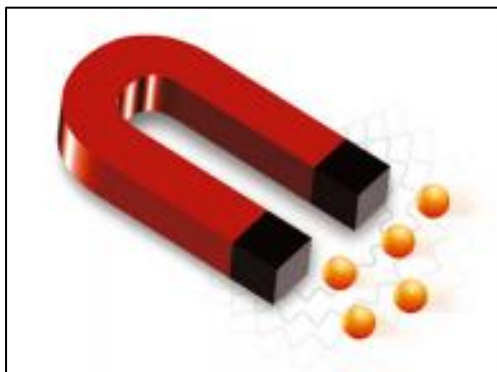


Fuente: López (2004).

1.6.2 Imanes Artificiales

Son los que se obtienen por imantación de ciertas sustancias metálicas. Es decir, un imán artificial es un cuerpo metálico al que se ha comunicado la propiedad del magnetismo, mediante frotamiento con un imán natural, o bien por la acción de corrientes eléctricas aplicadas en forma conveniente (Figura 12).

Figura 12. Imán convencional.



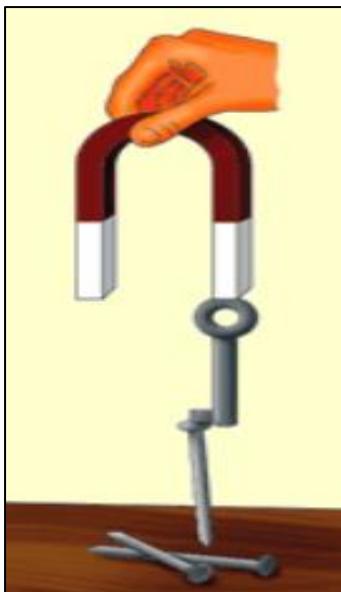
Fuente: López (2004).

1.6.3 Imanes Permanentes

Los imanes permanentes son caracterizados por tener un campo magnético dependiente de su magnetización. El campo Remanente B_r determina la densidad de flujo que permanece después de remover el campo que magnetiza al material para convertirlo en permanente y es la forma de medir la fuerza del imán. Mientras que la coercitividad bH_c es medida de la resistencia del material a su des magnetización o mejor dicho la cantidad de fuerza magneto motriz necesaria para desmagnetizar el imán. El rendimiento de un imán es usualmente especificado por su producto de energía, definido como un producto de la densidad de flujo B y su correspondiente campo H (Fonseca, 2017) (Figura 13).

Los rangos de operación de los materiales más usados como imanes permanentes se muestran en la Tabla 1.

Figura 13. Comportamiento del magnetismo.



Fuente: López (2004).

Tabla 1. Rango de operación de los materiales más usados como imanes permanentes.

	d (kg m^{-3})	α ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	ρ ($\mu\Omega \text{ m}$)	dM_s/dT ($\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	dH_c/dT ($\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	T_{max} ($^\circ\text{C}$)
SrFe ₁₂ O ₁₉ sintered	4300	10	10 ⁸	-0.20	0.45	250
SrFe ₁₂ O ₁₉ bonded	3600			-0.02	0.45	150
Alnico 5 cast	7200	12	0.5	-0.02	0.03	500
SmCo ₅ sintered	8400	11	0.6	-0.04	-0.02	250
Sm ₂ Co ₁₇ ^a sintered	8400	10	0.9	-0.03	-0.20	350
Nd ₂ Fe ₁₄ B sintered	7400	-2	1.5	-0.13	-0.60	160
Nd ₂ Fe ₁₄ B bonded	6000		200	-0.13	-0.06	150

Fuente: López (2004).

1.6.4 Imanes Temporales

Son aquellos que pierden sus propiedades magnéticas cuando deja de actuar sobre ellos la causa que produce la imantación. Los imanes construidos con hierro dulce son de este tipo. Estos imanes se utilizan para fabricar electroimanes para timbres eléctricos, telégrafos, teléfonos, etc. (Figura 14).

Figura 14. Comportamiento del magnetismo.



Fuente: López (2004).

1.6.5 Electroimanes

Un solenoide consiste en una bobina de hilo conductor recubierto de barniz u otro material aislante. Cada vuelta se denomina espira. Cuando la corriente pasa por el conductor, el solenoide se comporta como un imán, atrayendo al hierro, pero deja de hacerlo al cortar la corriente. La intensidad del campo magnético creado depende de la intensidad de corriente eléctrica que atraviesa el conductor y del número de espiras de la bobina.

1.6.6 Ley de Faraday

Cuando varía el campo magnético que atraviesa un conductor, se induce una f.e.m. en dicho circuito, que es proporcional a la velocidad con la que varía dicho flujo (Ley de Faraday):

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

El flujo magnético es el producto entre el campo magnético y el área que éste encierra:

$$\phi = B * A * \cos(\alpha)$$

N - número de vueltas en el embobinado;

t - tiempo.

Razonando estas expresiones, es fácil darse cuenta de que, si se produce un cambio, tanto en el campo magnético como en el área que atraviesa, se inducirá una fuerza electromotriz. En esta experiencia lo que se variará será el campo magnético (López, 2007).

1.7 Susceptibilidad y Permeabilidad

La susceptibilidad magnética es una constante que indica el grado de sensibilidad a la magnetización de un material expuesto a un campo magnético externo, y está directamente relacionado con la permeabilidad que expresa una magnetización total por unidad de volumen y es la capacidad del material para hacer pasar a través de él un campo magnético (Fonseca, 2017).

1.8 Ejes mecánicos

Un eje es una barra metálica usualmente de forma cilíndrica, sólida o hueca que es usada para soportar componentes rotatorios (Agitadores, por ejemplo) o para transmitir potencia o movimiento por rotación o movimiento axial. Los ejes operan bajo un amplio rango de condiciones de servicio, incluyendo atmósferas agresivas, diferentes niveles y tipos de esfuerzos, y desde temperaturas tan bajas como ambientes criogénicos, hasta extremadamente altas como el eje de una turbina a gas (Vélez, 2005).

1.8.1 Tipos de ejes

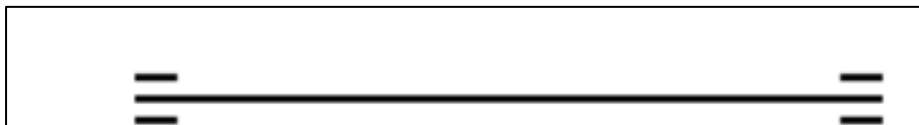
En la ingeniería se han estudiado los ejes a trasfondo llegando a dividirlos o clasificarlos en dos grupos: ejes fijos y ejes giratorios (árboles).

- **Ejes Fijos:** Permiten el giro de los elementos mecánicos situados sobre ellos, pero no giran solidariamente con ellos, es decir, los elementos mecánicos giran libremente sobre ellos
- **Ejes giratorios (árboles):** Además de cargar con los elementos giratorios también transmiten momentos torsores. Los ejes móviles resultan cargados con esfuerzos normales y esfuerzos tangenciales.

Existen varios tipos de ejes giratorios: eje recto, eje acodado, escalonado, árboles.

- **Eje recto:** es una pieza recta de tubería de acero con almohadillas de resorte soldadas al eje y provisiones de montaje para los pivotes y ejes en cada extremo exterior del eje. También se usa en la suspensión delantera de un vehículo. (Figura 15)

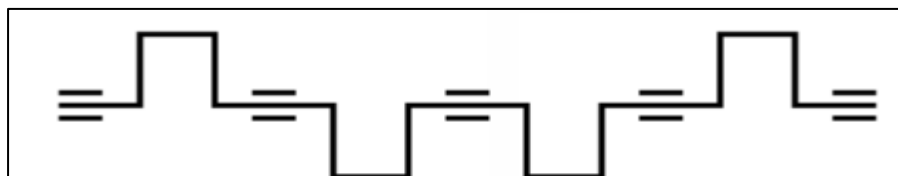
Figura 15. Esquema del árbol recto.



Fuente: Arenas y León (2012).

Eje acodado: también llamado cigüeñal, con codos y contrapesos presente en ciertas máquinas que, aplicando el principio del mecanismo de biela-manivela, transforma el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa (Figura 16).

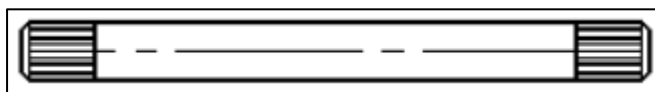
Figura 16. Esquema de árbol acodado.



Fuente: Arenas y León (2012).

- **Árboles de sección constante:** son usados en árboles que transmiten solo momentos torsores sin soportar momentos flectores (Figura 17).

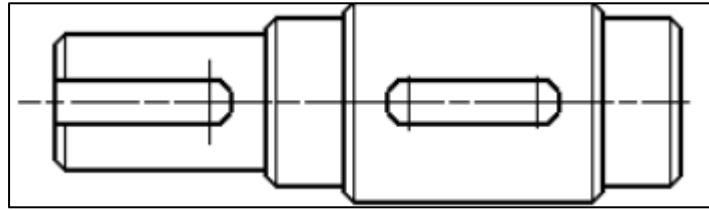
Figura 17. Árboles de sección constante.



Fuente: Arenas y León (2012).

- **Árbol escalonado:** son los más ampliamente usados. El escalonamiento es determinado por la distribución de los momentos flectores y torsores (Figura 18).

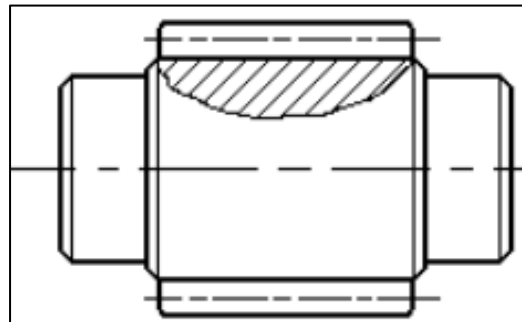
Figura 18. Árbol escalonado.



Fuente: Arenas y León (2012).

- **Árbol con talladuras especiales:** son árboles en los cuales se realizan elaboraciones especiales, como piñones, tornillos, etc. (Figura 19).

Figura 19. Árbol con talladura.



Fuente: Espinosa (2018).

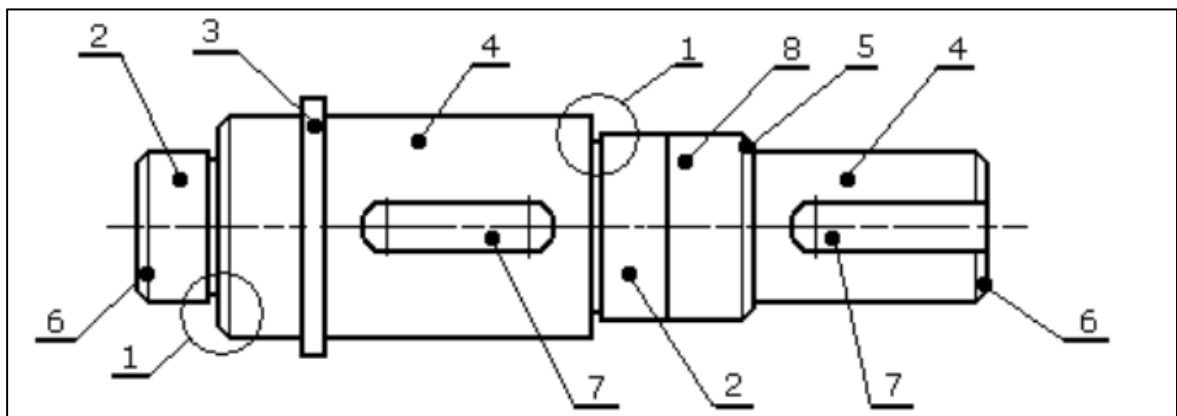
1.8.2 Materiales usados en la construcción de árboles de transmisión

- Los materiales empleados para la construcción de los árboles deben distinguirse por características de: resistencia suficientemente alta, pequeña sensibilidad a la concentración de tensiones, capacidad de poder ser tratados térmica y químico térmicamente y poseer buena maquinabilidad.
- La resistencia y rigidez son factores clave siempre tomados en cuenta en la selección de un material. Igualmente, importantes es la confiabilidad relativa y la durabilidad de la pieza cuando se consideran alternativas posibles con respecto al material.
- Todos los aceros tienen esencialmente el mismo módulo de elasticidad. Entonces, si el requisito decisivo del árbol o eje es la rigidez, como todos los aceros se comportan igual, debe seleccionarse el de menor costo.

- El contenido de carbono determina la máxima dureza que puede desarrollarse en el acero. El máximo potencial de dureza según el contenido de carbono puede llegar hasta cerca de 0,7%. Esto significa que se puede aplicar un tratamiento térmico a las partes con forma regular.
- Los elementos de aleación (manganeso, molibdeno, cromo, níquel y otros) elevan la capacidad de temple del acero. Por lo tanto, el potencial de dureza y resistencia (el cual está controlado por el contenido de carbono) puede obtenerse con tratamientos térmicos menos drásticos usando dichos elementos de aleación.

A continuación, en la Figura 20 se aprecian las secciones de un árbol de transmisión.

Figura 20. Secciones del árbol de transmisión.



Fuente: Espinosa (2018).

1. Ranura para diferenciar diámetros contiguos.
2. Muñones.
3. Escalón de apoyo.
4. Zona de ajuste para montaje de elementos.
5. Zona de transición para cojinetes.
6. Biseles para absorber cargas axiales.
7. Cuñeros.
8. Zona de centraje.

2. Diseño de cojinetes de levitación magnética

El método utilizado para el desarrollo de la investigación es experimental, con un enfoque cuantitativo, ya que se basa en un protocolo de control, con presencia de variables, la manipulación de dichas variables y la observación de resultados cuantificables. El diseño de los cojinetes de levitación se llevó a cabo siguiendo una metodología que, al utilizar los métodos y técnicas de investigación mencionadas, permitió definir las siguientes fases:

Fase 1. Determinación de los parámetros de los campos magnéticos. Los requerimientos se establecieron a través de estudios y cálculos para poder crear un campo magnético estable que pueda mantener un eje de una masa (m). Inicialmente, se hizo una revisión bibliográfica de parámetros, determinando radios de los campos magnéticos. De acuerdo con el resultado de esta revisión se seleccionó un campo magnético con adecuado radio para establecer la levitación del eje y luego se realizaron cinco pruebas de fuerza de sujeción con diferentes materiales.

Fase 2. Diseño del prototipo de cojinete magnético. Mediante el programa de diseño (Autodesk Inventor) se creó virtualmente el prototipo de cojinete con medidas, estudio de sus componentes y escala. Así mismo, se realizó el diseño del eje, posición, dimensión y escala.

Fase 3. Construcción del prototipo con base en el diseño. Se realizó la construcción del prototipo con base en los cálculos y dimensiones del diseño y se comprobó con ensayos de funcionamiento a diferentes cargas en un ambiente natural.

Fase 4. Realización de las pruebas de funcionamiento. En esta última fase se realizaron pruebas con el eje levitando a diferentes cargas para comprobar los esfuerzos máximos de la pieza. Así mismo se efectuó una simulación de resistencias a torsión del prototipo construido de ABS con carga en su centro de 25 Nm, que determinaron la resistencia del material.

2.1 Requerimientos

Los requerimientos técnicos para el desarrollo del diseño, construcción y ensayos del cojinete de levitación magnética exigen lograr un equipo que:

1. A través de la levitación logre disminuir considerablemente la fricción ocasionada por el rozamiento [μ] de elementos mecánicos
2. Sostener un eje con una masa aproximada de 350 gramos, un diámetro de media pulgada y con una longitud de 8 pulgadas
3. Que el diámetro interior del cojinete tenga media pulgada.
4. Que sus campos magnéticos sean estables y se puedan repeler sin dificultad.
5. Que al realizar un análisis comparativo entre cojinetes mecánicos y cojinetes magnéticos sean muy notables las cualidades y mejor rendimiento del cojinete magnético.

2.2 Determinación de los parámetros de los campos magnéticos

Para la determinación de los parámetros correspondientes a los campos magnéticos se realizaron las siguientes pruebas de fuerza de sujeción con diferentes materiales.

En la Tabla 2 se muestran los resultados al hacer la primera prueba de atracción en contacto directo, tomando 10 muestras con una gramera calibrada en kilogramos, con los imanes de neodimio, donde se puede evidenciar la atracción de cada uno de los ellos.

En la siguiente Tabla 3 se hace una segunda prueba tomando 10 muestras, con el imán montado en una carcasa de 1 mm de espesor. Se puede detallar que hay una pequeña disminución del poder de atracción.

Tabla 2. Prueba Contacto directo.

contacto directo	
1	1,77
2	1,67
3	0,77
4	1,88
5	1,65
6	1,56
7	1,77
8	1,89
9	1,87
10	1,78
N datos	10
valor med	1,661
des estandar	0,33104045

Fuente: Autores, 2021.

Tabla 3. Prueba con carcasa de 1mm.

con carcasa de 1mm	
1	1,23
2	1,22
3	1,15
4	1,07
5	1,2
6	1,13
7	1,25
8	1,33
9	1,33
10	1,33
N datos	10
valor med	1,224
des estandar	0,09008638

Fuente: Autores, 2021.

En la Tabla 4 se muestra una tercera prueba que se hace sobre un cajón de 7 mm de grosor tomando las mismas 10 muestras tomadas anteriormente, donde se observa una disminución considerable en el poder de atracción.

Tabla 4. Prueba con carcasa de 7 mm.

con carcasa de 7mm	
1	0,87
2	0,98
3	0,79
4	0,75
5	0,82
6	0,93
7	0,82
8	0,8
9	0,81
10	0,76
N datos	10
valor med	0,833
des estandar	0,07334091

Fuente: Autores, 2021.

Los resultados de la siguiente prueba se pueden ver en la Tabla 5. Se realizaron las muestras con una lámina ferromagnética de 1mm de espesor. Se aprecia un aumento bastante alto con respecto a la prueba anterior.

Tabla 5. Prueba con lámina ferromagnética de 1 mm.

lamina ferromagnetica 1mm	
1	1,56
2	1,62
3	1,64
4	1,54
5	1,23
6	1,43
7	1,45
8	1,41
9	1,39
10	1,39
N datos	10
valor med	1,466
des estandar	0,12482877

Fuente: Autores, 2021.

En la última prueba, como se muestra en la Tabla 6 se tomaron 10 muestras con una goma de 1 cm de grosor. Se puede observar una disminución de poder de atracción bastante alta con respecto a las pruebas anteriores.

Tabla 6. Prueba con goma de 1 cm.

con goma de 1 cm	
1	0,21
2	0,24
3	0,21
4	0,2
5	0,31
6	0,26
7	0,25
8	0,26
9	0,24
10	0,22
N datos	10
valor med	0,24
des estandar	0,03265986

Fuente: Autores, 2021.

Figura 21. Experimento fuerza de atracción de imanes.



Fuente: Autores, 2021.

2.2. Diseño conceptual

Para un mejor rendimiento de los cojinetes mecánicos convencionales, se propone un dispositivo de levitación magnética que sea capaz de crear campos magnéticos estables y sostener un eje de cierta masa, con el fin de tener un bajo coeficiente de fricción y obtener un mejor comportamiento en la rotación de eje.

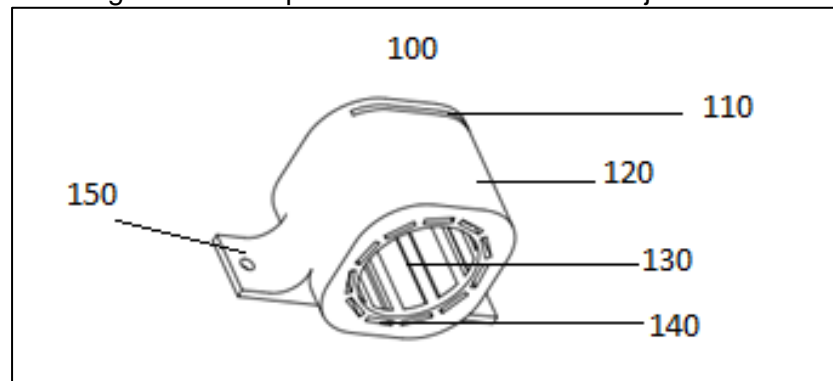
Por tal razón, el presente trabajo de investigación relaciona un dispositivo con movimiento manual de levitación que estabiliza sus campos magnéticos y así permite la incorporación de un eje, el cual pueda rotar con un coeficiente bajo en fricción. Consta de las siguientes partes:

- Carcasa uno con ranuras internas (100)
- Eje tipo árbol con muñones ranurados (200)
- Carcasa dos con ranuras internas (100)
- Lámina base del proyectó (300)

Las carcasas de este proyecto constan de los siguientes componentes:

- Ranura donde se acopla una placa metálica (110)
- Cara horizontal de la carcasa (120)
- Ranura lateral de los imanes de neodimio (130)
- Ranura vertical de los imanes de neodimio (140)
- Pestañas de sujeción (150)

Figura 22. Componentes de carcasa del cojinete.

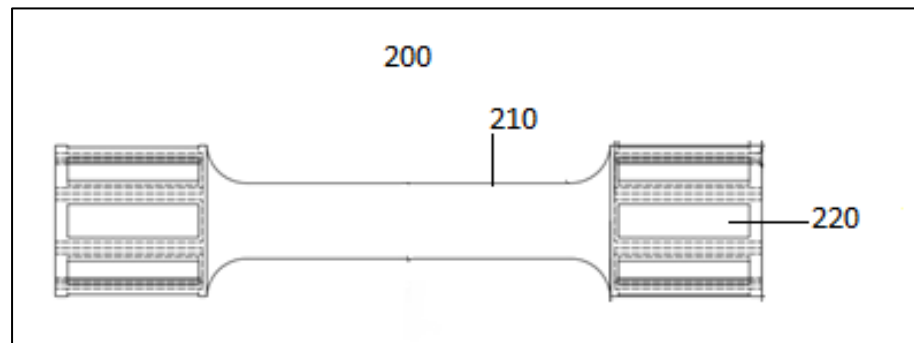


Fuente: Autores, 2021.

El eje de este proyecto está compuesto por:

- Eje construido en polímero PET (210)
- Dieciséis ranuras para imanes de neodimio (220)

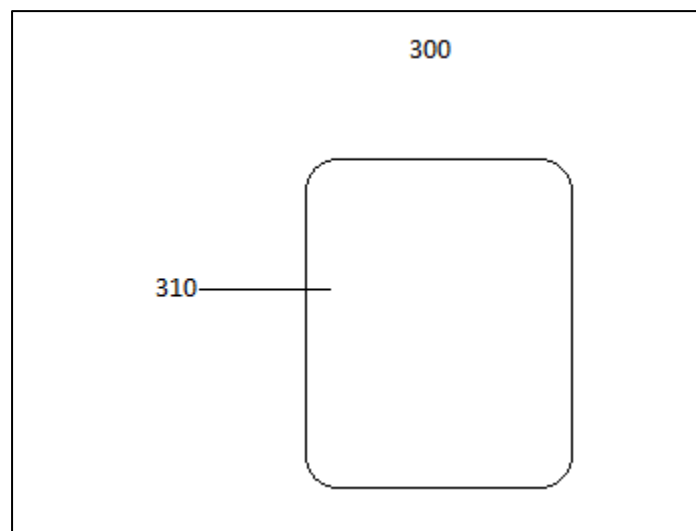
Figura 23. Eje del cojinete.



Fuente: Autores, 2021.

La base de este proyecto comprende un soporte plástico (310) fabricado en polietileno (C_2H_4)_n (Figura 24).

Figura 24. Base del proyecto.



Fuente: Autores, 2021.

- Base
- Carcasa 1

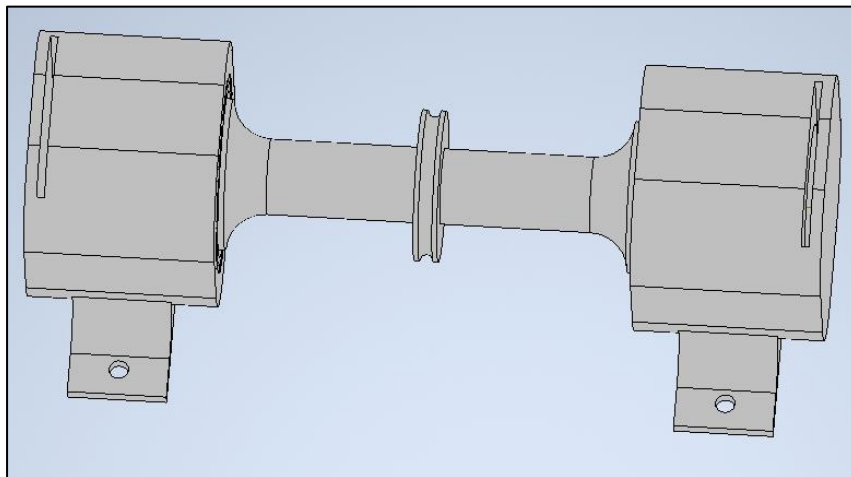
- Carcasa 2
- Anillo interno 1
- Anillo interno 2
- Eje
- Imán 38

La estructura soporta todos los elementos que forman parte del equipo y está compuesto por:

- Base
- Espárragos (4)

A continuación, se realizó el montaje sobre las carcavas haciendo una modificación en el eje, agregándole una polea para realizar pruebas de resistencia a la flexión con fuerzas de 30 N, 100 N y 300 N (Figura 25).

Figura 25. Montaje sobre carcavas para pruebas de resistencia.



Fuente: Autores, 2021.

En la Figura 26 se puede observar una breve descripción del material con el que se fabricaron las piezas del prototipo.

Figura 26. Material ABS para fabricación de prototipo.

The screenshot shows the 'Material Editor: ABS Plastic' window with the 'Identity' tab selected. The 'Name' field contains 'ABS Plastic'. Under 'Descriptive Information', the 'Description' is 'Acrylonitrile butadiene styrene' and the 'Type' is 'Plastic'. There are empty input fields for 'Comments' and 'Keywords'. Under 'Product Information', there are empty input fields for 'Manufacturer' and 'Model'.

Fuente: Autores, 2021.

En la Figura 27 se muestran las características térmicas del material ABS. Se pueden observar la conductividad térmica, el calor específico y el coeficiente de expansión térmica, también se puede apreciar el esfuerzo máximo a flexión que es 20 Mpa y el esfuerzo máximo a tensión que es 29,6 Mpa de esta pieza.

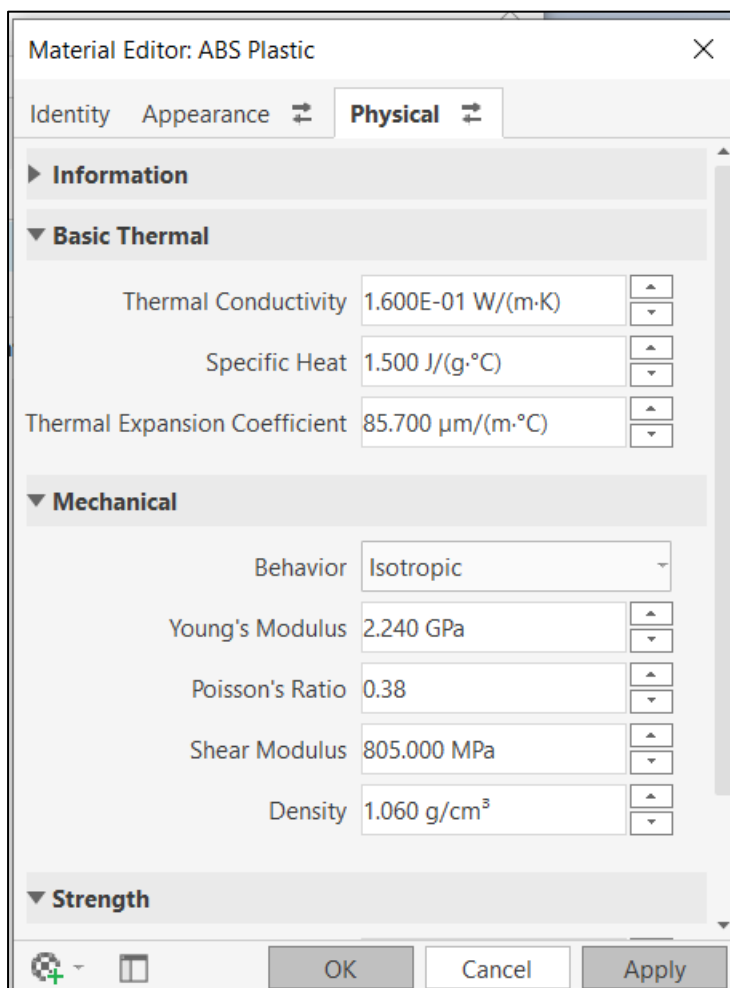
Figura 27. Características térmicas de material ABS.

The screenshot shows the 'Material Editor: ABS Plastic' window with the 'Physical' tab selected. Under the 'Basic Thermal' section, the following properties are listed: Thermal Conductivity (1.600E-01 W/(m·K)), Specific Heat (1.500 J/(g·°C)), and Thermal Expansion Coefficient (85.700 μm/(m·°C)). Under the 'Strength' section, the following properties are listed: Yield Strength (20.000 MPa) and Tensile Strength (29.600 MPa). Each value is in a text input field with up and down arrow buttons.

Fuente: Autores, 2021.

En la Figura 28 se observan también las características térmicas y mecánicas de este material, tales como el comportamiento isotrópico, el módulo de Young, el radio de Poisson, módulo de corte y su densidad.

Figura 28. Características térmicas y mecánicas de materiales empleados.



Fuente: Autores, 2021.

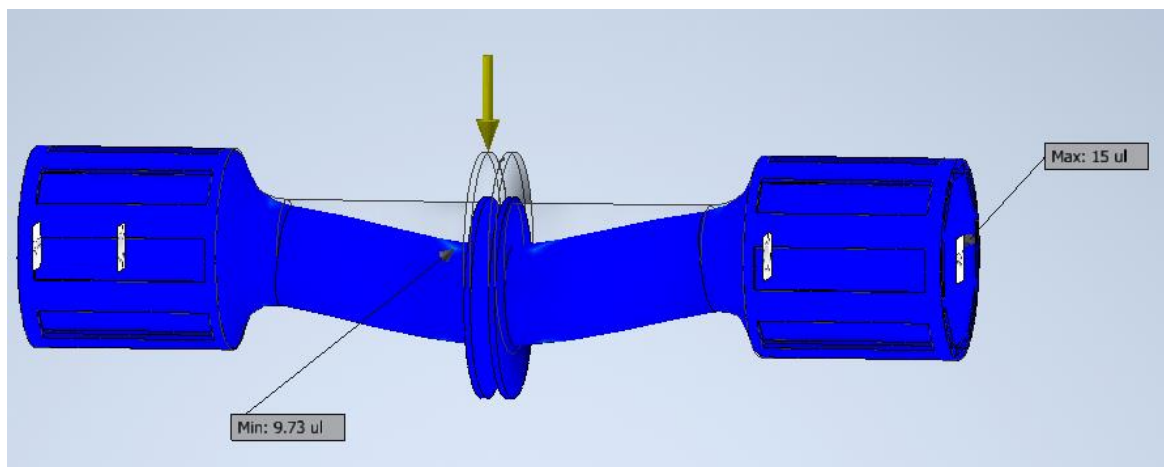
2.3 Pruebas realizadas con diferentes masas en ambiente natural

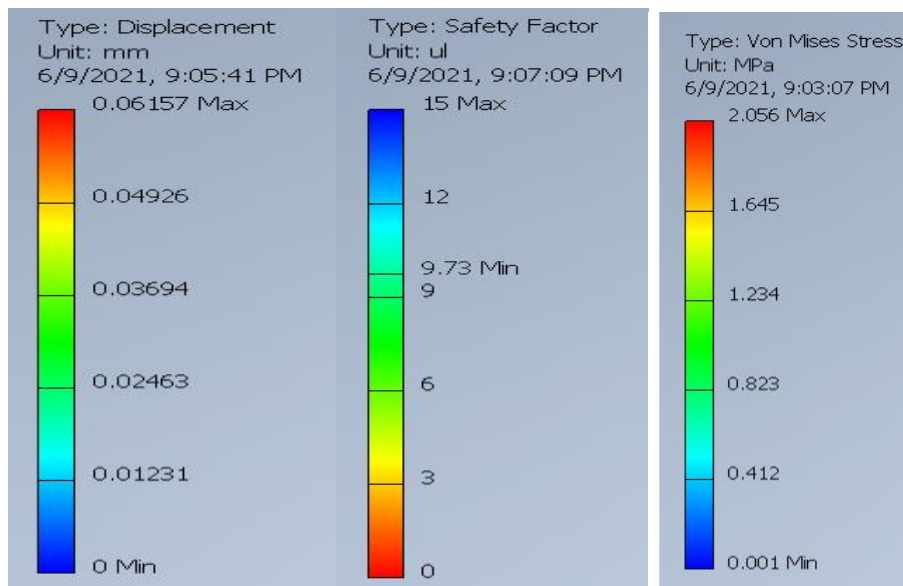
Se realizaron pruebas por medio de simulaciones con tres cantidades de masa para verificar la resistencia a flexión (3.061 kg equivalente a 30 N; 10.204 kg, equivalente a 100 N y 30.6012kg, equivalente a 300 N), donde se observan los siguientes resultados.

Los ensayos se realizaron en un ambiente natural con unos parámetros de temperatura y atmósfera promedio para la ciudad de Tunja, Boyacá, que es 11.8°C de temperatura ambiente.

En la Figura 29 se muestra la primera prueba realizada con una carga de 30 N, donde se observa el desplazamiento, el factor de seguridad y la resistencia a flexión, el cual da un resultado mínimo bajo esta carga.

Figura 29. Primera prueba con carga de 30 N.

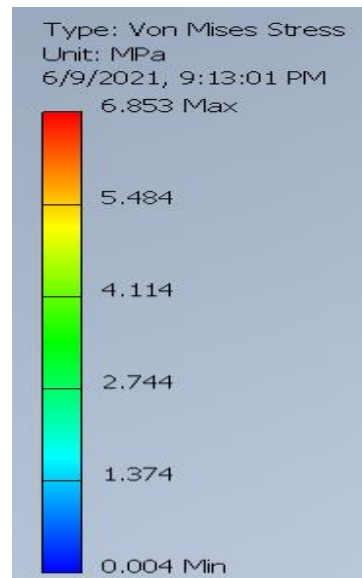
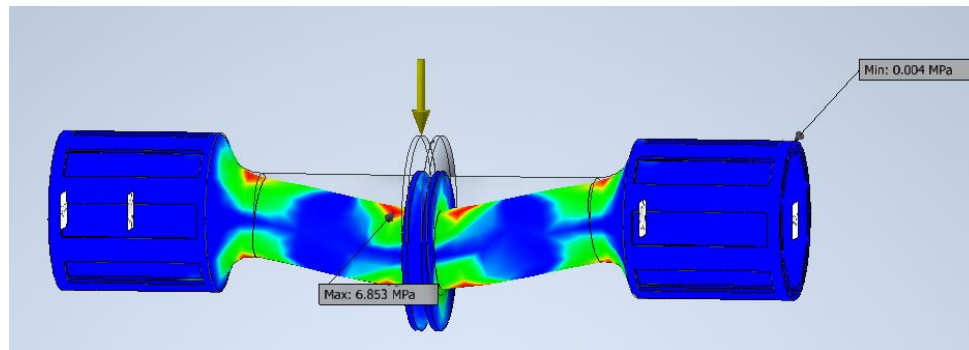




Fuente: Autores, 2021

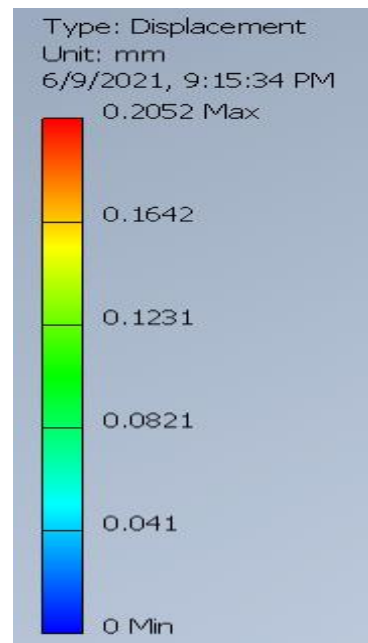
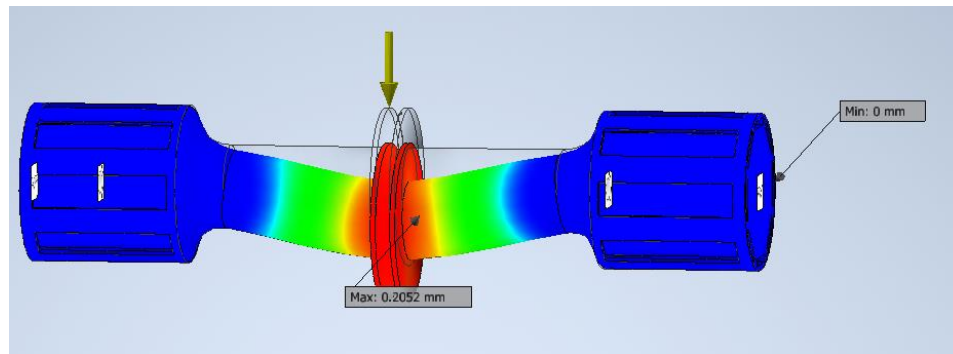
En las figuras 30, 31 y 32 se pueden apreciar las simulaciones para 100 N de carga donde se ve el esfuerzo, el desplazamiento y el factor de seguridad, aquí se comprueba que el esfuerzo máximo generado con una carga de 100N, no excede a la resistencia a cedencia del material de la pieza; por lo tanto, no se romperá y es resistente.

Figura 30. Segunda simulación (A) para 100 N de carga.



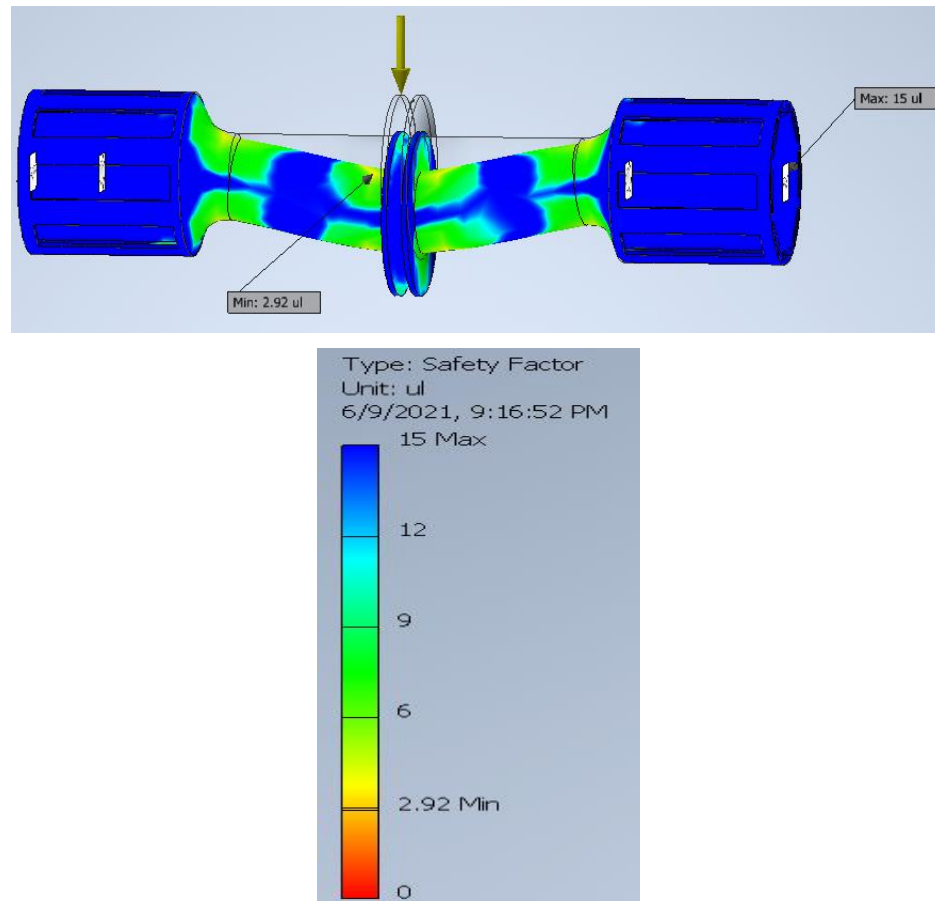
Fuente: Autores, 2021.

Figura 31. Segunda simulación (B) para 100 N de carga.



Fuente: Autores, 2021.

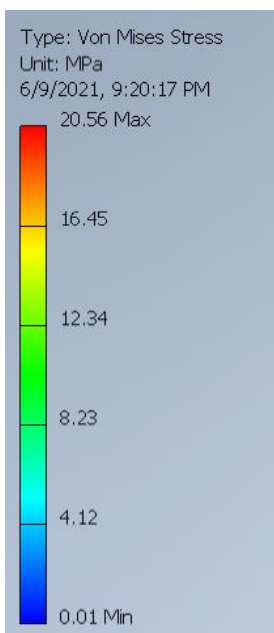
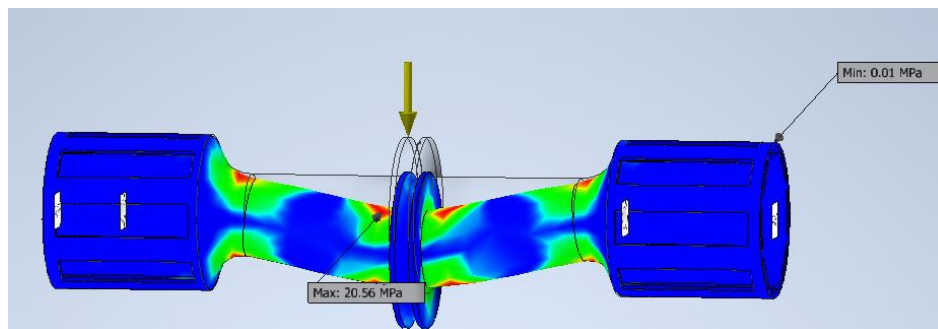
Figura 32. Segunda simulación (C) para 100 N de carga.



Fuente: Autores, 2021.

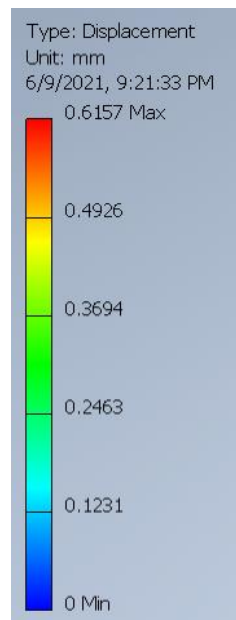
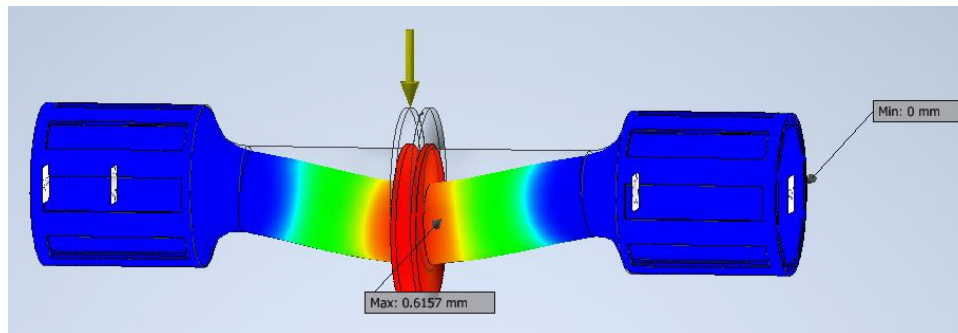
En las figuras 33, 34 y 35 se presenta la simulación para 300 N de carga, donde el esfuerzo, el desplazamiento y el factor de seguridad aplicado confirman que con una carga de 300N, en el que sobrepasa el esfuerzo máximo, con un valor de 20,56 Mpa lo que ocasionará la ruptura de la pieza.

Figura 33. Tercera simulación (A) para 300 N de carga.



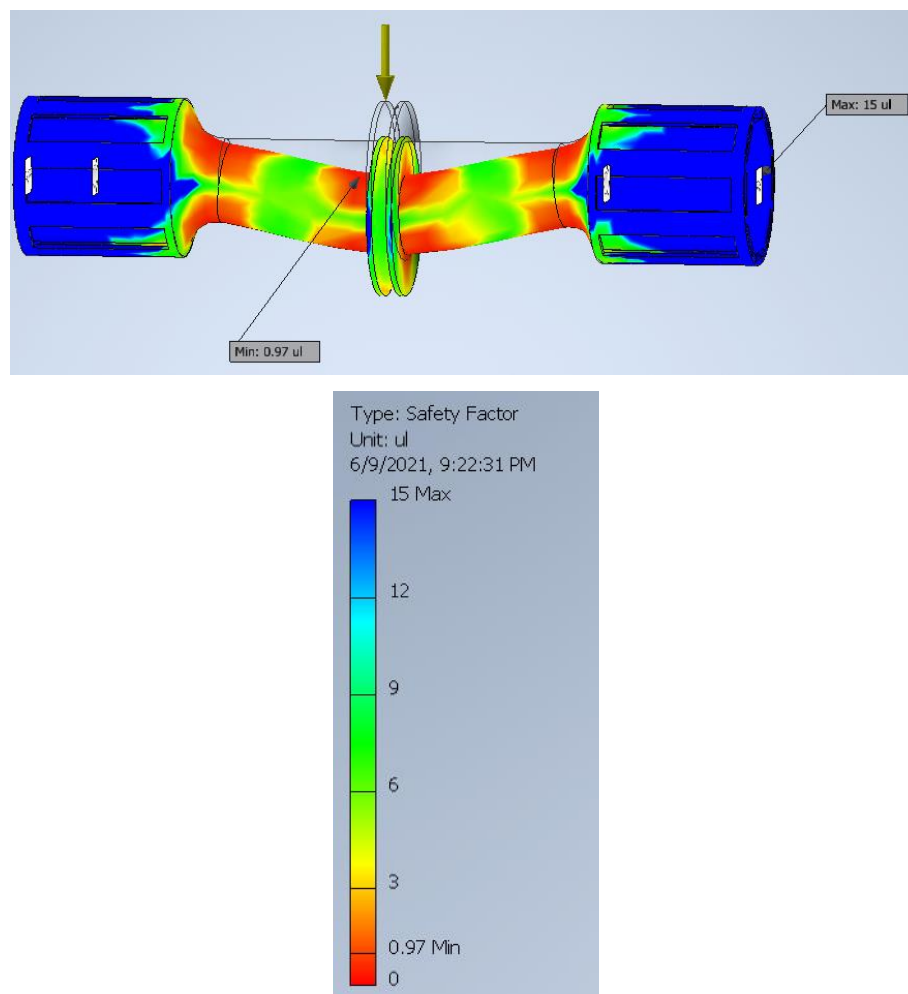
Fuente: Autores, 2021.

Figura 34. Tercera simulación (B) para 300 N de carga.



Fuente: Autores, 2021.

Figura 35. Tercera simulación (C) para 300 N de carga.

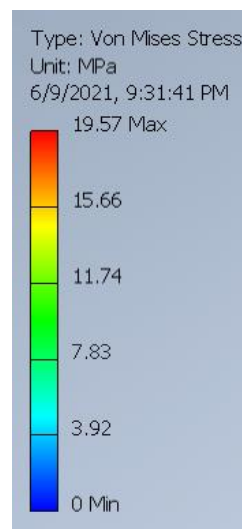
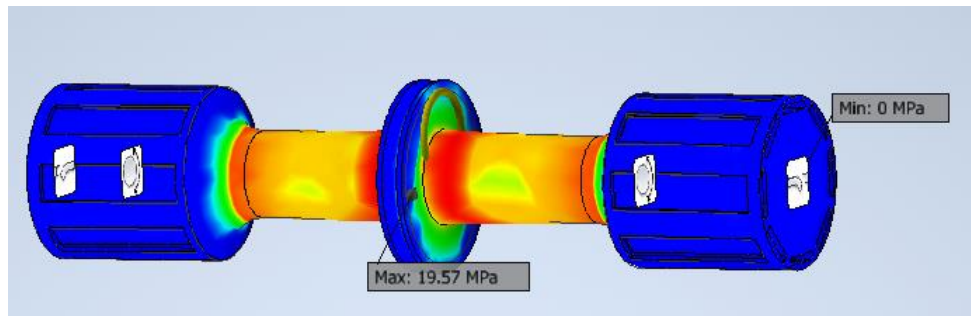


Fuente: Autores, 2021.

2.4 Pruebas de resistencias a torsión

Siguiendo con el procedimiento establecido para el desarrollo del proyecto, se realizó la simulación de las resistencias a torsión del prototipo construido de ABS con carga en su centro de 25 Nm, donde se puede verificar el desplazamiento, factor de seguridad y esfuerzo realizado (ver Figuras 36, 37 y 36).

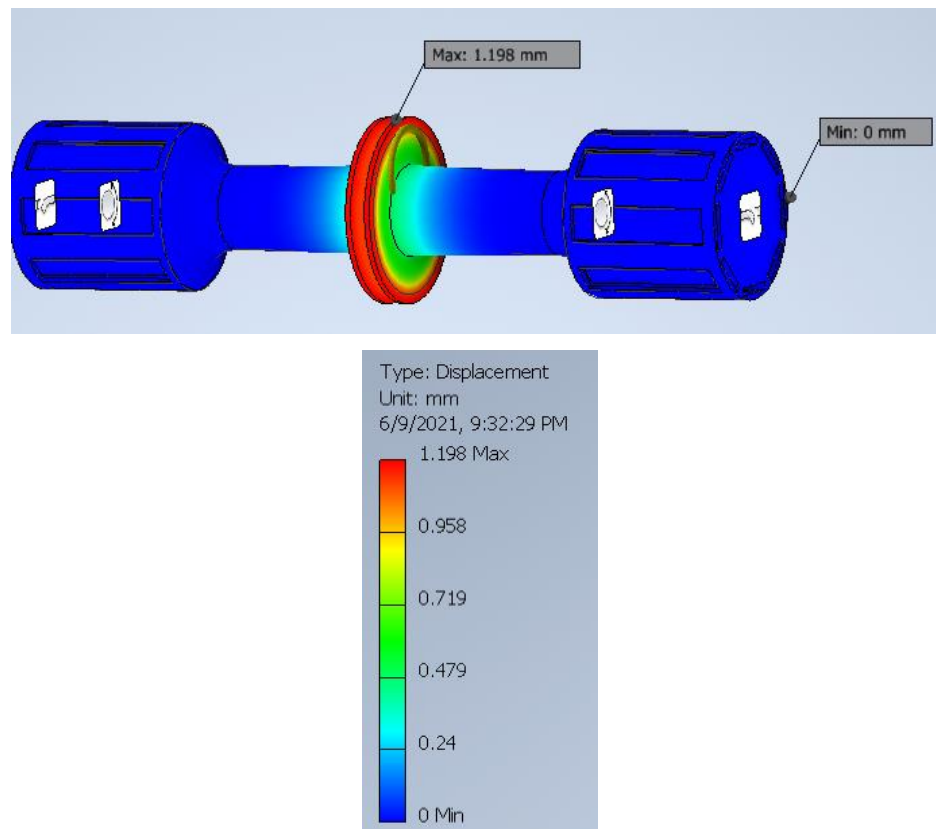
Figura 36. Prueba de resistencias a torsión (A) bajo 25 Nm.



Fuente: Autores, 2021.

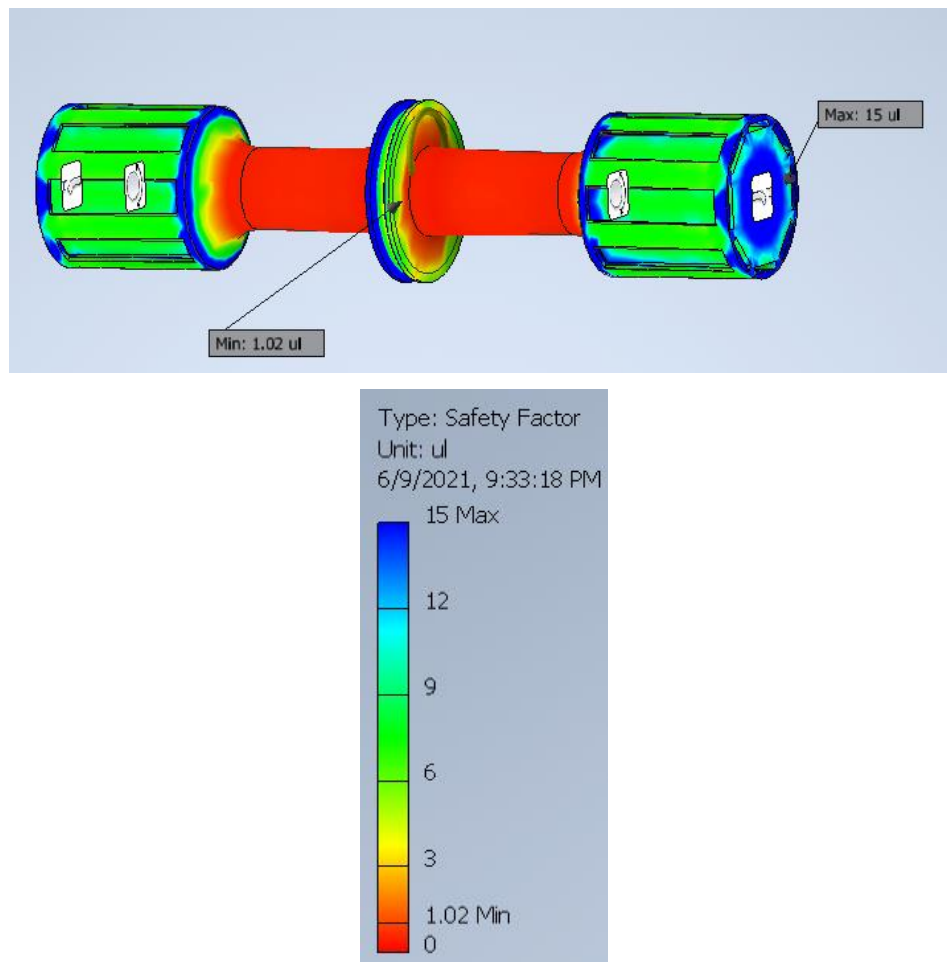
Como se puede observar, bajo 25 Nm, la pieza sigue trabajando sin romperse.

Figura 37. Prueba de resistencias a torsión (B) bajo 25 Nm.



Fuente: Autores, 2021.

Figura 38. Prueba de resistencias a torsión (C) bajo 25 Nm.



Fuente: Autores, 2021.

3. Construcción y Ensayos del cojinete magnético

Para la realización de la propuesta de construcción del prototipo del cojinete de levitación mediante imanes rectangulares de neodimio, fue necesario llevar a cabo una ejecución procedimental para lograr el desarrollo de los objetivos planteados. Para tal fin se establecieron las fases de acción enunciadas a continuación.

Como fase inicial, se tomó la propiedad de repulsión que tienen los imanes de neodimio con la mayor remanencia, una muy alta coercividad y producto energético, tomando las especificaciones técnicas elementales y luego se procedió a realizar su diseño correspondiente. La segunda fase consistió en tomar los referentes del diseño para su construcción, la cual se hizo con selección de materiales, planos de dibujo mecánico, fabricación de sus partes, pruebas de ensayo y error, resultados de las pruebas y mejoras en caso de ser necesarias. En la tercera fase, con el diseño previo hecho, se procedió a la construcción de cojinetes magnéticos. La cuarta fase consistió en la realización de pruebas y ensayos para el cojinete.

3.1 Construcción del cojinete

Con el diseño previo, se procedió a realizar la elección de materiales, usando polímeros para evitar una alteración del magnetismo con materiales metálicos. En este caso, El acrilonitrilo butadieno estireno (**ABS**) que es un polímero amorfo procedente de la emulsión o polimerización en masa de acrilonitrilo y estireno en presencia de polibutadieno y el Polietileno Tereftalato, también conocido por su sigla **PET**, fueron los principales materiales para la construcción de las estructuras definidas.

3.1.1 Base para el cojinete magnético

La base para el cojinete magnético es el elemento encargado de servir como soporte a las dos carcassas que se sujetan a este con dos tornillos cada carcassa, con una longitud de 50 cm, una anchura de 38 cm y una altura de 1 cm la base. Esta lámina de material plástico fue escogida a conveniencia en el comercio ya que cumple con las características necesarias para el proyecto.

3.1.2 Carcasa para el cojinete magnético

Esta estructura fue la parte principal para el desarrollo del proyecto, ya que tiene como fin presentar la funcionalidad y mejora de la eficiencia del cojinete magnético al permitir la movilidad mecánica del eje sobre el campo magnético.

Para su fabricación, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Se realizó con el mismo material del compendio anterior.
- Se elaboraron unas carcassas semi redondas gracias a la impresora 3D de la UAN con un diámetro interior de 42mm y con ranuras internas donde reposan los imanes con unas dimensiones de 35mm de largo por 1cm de ancho y 1mm de alto y dos pestañas en los costados horizontales para poder soportarlas a la base.

3.1.3 Elaboración del eje tipo árbol

Esta pieza es fundamental para la obtención del objetivo de este proyecto, ya que con esta se puede observar y comprobar que existe levitación gracias al magnetismo. En su fabricación se establecieron los siguientes elementos:

- Se realizó del mismo material mencionado anteriormente (ABS)
- Se elaboró un eje tipo árbol construido en forma de cilindro con un diámetro central de 2 cm y dos muñones de longitud 2.5cm con un diámetro de 38.8mm.
- En los muñones se hacen ranuras axiales para montar los imanes respectivos.
(Nota las dimensiones de los muñones las sacamos de una distribución redonda de forma horizontal de los imanes con un distanciamiento de 2mm entre cada uno como los imanes tienen 3.5 cm de largo dejamos el largo de los muñones de 4 cm y un diámetro de 3.81)

3.1.4 Ensamble funcional

Adicionalmente, después de haber elaborado el eje y las carcasas se tienen en cuenta los aspectos relacionados en las siguientes líneas: el ensamble de las piezas que se realizó según el diseño previo y la unión de estas partes plásticas realizado con tornillería, la unión del eje y el interior de las carcasas es producto de la atracción magnética y las láminas externas en posición vertical. Cabe resaltar que, la mayor parte de la estructura es desarmable, esto ayuda a poder realizar mejores pruebas, buena protección y fácil transporte.

3.2 Pruebas realizadas

Para realizar las pruebas se llevaron a cabo los siguientes pasos:

La primera fase contempló la elaboración de un par de cajones con las siguientes medidas: ancho 1.2 cm, una longitud de 4 cm de largo y una altura de 5 mm, fabricados en la impresora 3D; donde se comprobó la repelencia y atracción natural en polos de los imanes de neodimio como se muestra en la figura 39; con esto también se establecieron las medidas necesarias para que el imán encajara bien dentro de los cajones y tuviera un excelente acople con el polímero (PET).

Figura 39. Cajones.



Fuente: Autores, 2021.

Luego, en la segunda fase se creó una carcasa con un diámetro interno de 42mm como se observa en la figura 40, en la cual se implementaron 11 imanes en su parte interior colocadas horizontalmente con un distanciamiento de 3 mm para evitar una variación del magnetismo y que el eje pudiera tener más comodidad para centrarse gracias a la repelencia de los imanes por el fenómeno conocido como múltiple atracción o repelencia en magnetismo.

Figura 40. Carcasa.



Fuente: Autores, 2021.

En la tercera fase se crea el eje gracias a la impresora 3D, la mitad del eje con un muñón en su extremo, el cual posee ocho cajones externos donde van insertados los imanes de neodimio (Figura 41)

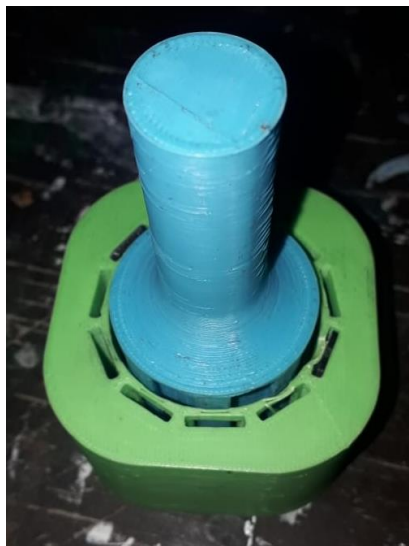
Figura 41. Eje con muñón.



Fuente: Autores, 2021.

Cuarta fase. Se realizaron pruebas para acoplar el eje con la carcasa, probando las diferentes repelencias de los imanes en las ranuras de la carcasa (Figura 42)

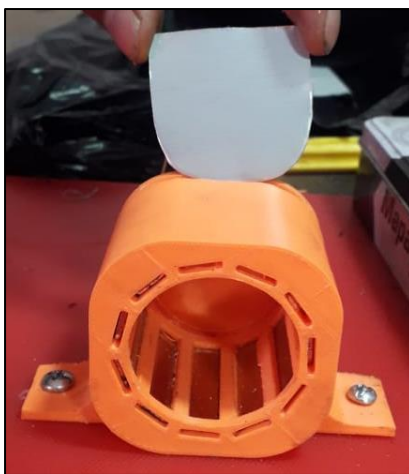
Figura 42. Acople de la carcasa con muñón.



Fuente: Autores, 2021.

Quinta fase. Luego de hacer las pruebas respectivas se procede a realizar ajustes en el diseño de las carcasas agregándoles dos pestañas de sujeción para fijarlas en la base, también se agrega una ranura en la parte posterior para insertar una placa metálica que estabilice el eje por el fenómeno de la atracción (Figura 43).

Figura 43. Ajustes al diseño de carcasa.



Fuente: Autores, 2021.

Fase seis. Se fabrica el eje completo para hacer el montaje en las dos carcadas o estatores, en la siguiente figura 44 se muestra que por una falla de la impresora 3D o una falla en la energía, el eje quedó incompleto.

Figura 44. Montaje del eje en carcadas.



Fuente: Autores, 2021.

Luego de hacer algunos ajustes a las dimensiones del eje y a la impresora 3D, se fabricó nuevamente el eje terminándolo satisfactoriamente, se procedió a insertar los imanes para verificar que encajaran correctamente como se observa en la Figura 45.

Figura 45. Fabricación de nuevo eje.



Fuente: Autores, 2021.

En la séptima fase se procedió a hacer el montaje de las carcasas y el eje sobre la base, sujetando las carcasas con tornillos para metales de rosca fina e instalando el eje entre ellas como se aprecia en la figura 46.

Figura 46. Montaje de carcasas y eje sobre la base.



Fuente: Autores, 2021.

En esta fase se observa que el eje es inestable y se adhiere a las paredes de las carcasas debido a que los imanes no tienen el mismo poder de repelencia entre polos; esto genera una dificultad porque no gira el eje de manera estable.

Para sortear la dificultad anterior y poder darle estabilidad al eje, se crearon dos anillos de teflón internos para que el eje se estabilice y no se mueva en ninguna dirección (se escogió teflón debido a su bajo coeficiente de fricción con el plástico ABS) (Figura 47).

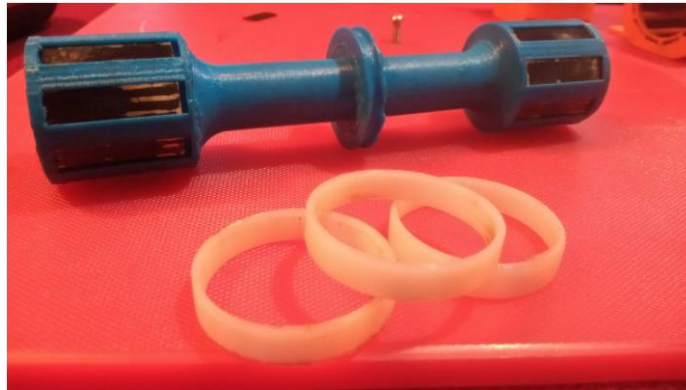
Figura 47. Fabricación de anillos en teflón.



Fuente: Autores, 2021.

En la Figura 48 se muestran los anillos ya fabricados por torno, los cuales tienen un grosor de 5 mm, un diámetro interno de 381 mm, un diámetro externo de 384 mm; estos anillos van insertados dentro de las carcasas y sobrepuestos sobre los muñones del eje.

Figura 48. Anillos de teflón.



Fuente: Autores, 2021.

En la Figura 49 se muestra una prueba de ensayo con una pieza fabricada con una densidad de 25% y una carga máxima de 40N donde el eje rota a 295 rpm que fueron medidas con un tacómetro; la rotación es generada con la ayuda de un taladro que está conectado con la polea del eje mediante una correa.

Figura 49. Prueba de ensayo con pieza fabricada.



Fuente: Autores, 2021.

Figura 50. Tacómetro.



Fuente: Autores, 2021.

Luego se realiza una prueba de ensayo destructivo con una carga máxima de 70N como lo muestra la figura 51, donde se puede observar que la pieza sufre una falla, ya que existe un concentrador de esfuerzos de 90° entre el eje y la polea.

Figura 51. Prueba de ensayo destructivo.



Fuente: Autores, 2021.

3.3 Análisis de los resultados

Las simulaciones con diferentes cargas aplicadas al eje, permiten evidenciar la resistencia del material ABS por medio de simulaciones con distintas cargas a flexión (30 N, 100 N, 300 N); también se comprueba que, con una carga a torsión de 25 Nm, sobrepasa la resistencia de la pieza y se rompe.

El ensamble de las piezas del prototipo se realizó según el diseño previo, con la unión de las partes plásticas con tornillería; y la unión del eje y el interior de las carcasas, producto de la atracción magnética y las láminas externas en posición vertical. Lo anterior con el fin de obtener una estructura desarmable, lo cual permite realizar mejores pruebas, buena protección y fácil transporte.

Con las pruebas realizadas a las piezas del prototipo se comprobó que los cajones fabricados en impresora 3D muestran la repelencia y atracción natural en polos de los imanes de neodimio; con esto se establecieron las medidas necesarias para que el imán encajara bien dentro de los cajones y tuviera un excelente acople con el polímero (PET).

Con la creación de una nueva carcasa, en la cual se implementaron 11 imanes en su parte interior colocadas horizontalmente con un distanciamiento de 3 mm se evitó una variación del magnetismo para que el eje pudiera tener más comodidad para centrarse gracias a la repelencia de los imanes por el fenómeno conocido como múltiple atracción o repelencia en magnetismo. También se agregaron dos pestañas de sujeción para fijarlas en la base y una ranura en la parte posterior para insertar una placa metálica que estabilice el eje por el fenómeno de la atracción. Con el fin de estabilizar el eje se fabricaron dos anillos de teflón, ya que, en razón a la baja fricción del eje, éste no podría rotar libremente entre ellos.

La realización de la prueba de ensayo en una pieza fabricada con una densidad de 25% y una carga de 40 N, comprueba que el eje rota a 295 rpm.; la rotación es generada con la ayuda de un taladro conectado a la polea del eje mediante una correa. Finalmente se realiza una prueba de ensayo destructivo con una carga máxima de 70N donde se puede observar que la pieza sufre una falla, ya que existe un concentrador de esfuerzos de 90° entre el eje y la polea.

3.3.1 Resultados obtenidos en la simulación a diferentes cargas y densidades

Tabla 7. Resultados de simulación bajo una carga de 100 N.

Resultado simulación						
CARGA	100N					
densidad	Desplazamiento máximo	Desplazamiento mínimo	Factor de seguridad máx	Factor de seguridad mín	Esfuerzo Máx a flexión	Esfuerzo Mín a flexión
100%	0.2052 mm	0	15	2.92	6.853 Mpa	0.004 Mpa
50%	0.01026 mm	0	7.5	1.46	3.426 Mpa	0.002 Mpa
25%	0.0513 mm	0	3.75	0.73	1.713 Mpa	0.001 Mpa
10%	0.02052 mm	0	1.5	0.292	0.685 Mpa	0.0004 Mpa

Fuente: Autores, 2021.

Tabla 8. Resultados de simulación bajo una carga de 300 N.

Resultado simulación						
CARGA	300N					
densidad	Desplazamiento máx	Desplazamiento mín	Factor de seguridad max	Factor de seguridad mín	Esfuerzo Máx a flexión	Esfuerzo Mín a flexión
100%	0.6157 mm	0	15	0.97	20.56 Mpa	0.01 Mpa
50%	0.3078 mm	0	7.5	0.485	10.28 Mpa	0.005 Mpa
25%	0.1539 mm	0	3.75	0.242	5.14 Mpa	0.0025 Mpa
10%	0.0615 mm	0	1.5	0.097	2.056 Mpa	0.001 Mpa

Fuente: Autores, 2021.

Tabla 9. Resultados de simulación bajo una carga de 30 N.

Resultado simulación						
CARGA	30N					
densidad	Desplazamiento máx	Desplazamiento mín	Factor de seguridad max	Factor de seguridad min	Esfuerzo Máx a flexión	Esfuerzo Mín a flexión
100%	0.06157 mm	0	15	9.73	2.056 Mpa	0.001 Mpa
50%	0.03078mm	0	7.5	4.86	1.028 Mpa	0.0005 Mpa
25%	0.01539mm	0	3.75	2.43	0.514 Mpa	0.00025Mpa
10%	0.00615 mm	0	1.5	0.97	0.205 Mpa	0.0001Mpa

Fuente: Autores, 2021.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Con el desarrollo de este proyecto se logró el alcance de los objetivos planteados en la investigación, los cuales están enfocados al diseño, construcción y modelamiento de un prototipo de cojinetes de levitación magnética funcional para usos de investigación en la Universidad Antonio Nariño.

Se evidencia que existe levitación magnética con la interacción de los imanes de neodimio instalados en el eje y las carcasas.

Se logró la construcción de un prototipo de cojinetes de levitación magnética.

Se construyó un eje en el que se insertan imanes de neodimio y por medio de estos se logra que el eje levite entre las carcasas.

Con la realización de una prueba de ensayo en una pieza con una densidad de 25% y una carga máxima de 40 N, donde el eje rota a 295 rpm, se comprueba que el eje levita entre los cojinetes mostrando una rotación exitosa.

A través del análisis de los resultados de las simulaciones se logró determinar la resistencia del material.

Con el aumento de la densidad en un 50% en la fabricación de una nueva pieza se pudo lograr una mayor resistencia.

Se logró cumplir con el diseño y la modelación de las piezas realizadas en el software de diseño (Autodesk inventor).

4.2 Recomendaciones

- Continuar con los ensayos para el perfeccionamiento de este prototipo.
- Estudiar este proyecto implementando imanes con una mayor magnetización.
- Estudiar y analizar sobre un campo magnético más eficiente para mejorar la estabilidad entre polos iguales.
- Investigar más las aplicaciones magnéticas en la ingeniería mecánica.
- Realizar otra investigación sobre cojinetes de levitación implementado electroimanes.

Bibliografía

- Arenas Mancilla, E. & León Pico, J. G. (2012) *Ejes y manual de diseño*. Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica. Santander, Colombia.
<https://es.slideshare.net/ClementeGarcia4/ejesy-arboles-manual-de-diseo-uis>
- Arredondo J.; Jugo J. & Etxeverría V. (2004). *Modelacion y Control de un Eje Sustentado mediante levitación magnética activa*. XXV Jornada de Automática, 9. UPV/EHU. Leioa. Vizcaya, España.
<https://intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXV/documentos/49-oscejosoeh.pdf>
- Brunete A, San Segundo P. y Herrero R (2020) *Introducción a la Automatización Industrial*. Universidad Politécnica de Madrid.
https://bookdown.org/alberto_brunete/intro_automatica/prefacio.html#
- Cruz M., Gutiérrez O., Lozada N. & Luviano A. (2017). *Modelado y control de un sistema de levitación magnética basado en un cojinete magnético activo*. Revista Electrónica Nova Scientia (pág. 26). Universidad de la Salle. Bajío, México.
<http://www.scielo.org.mx/pdf/ns/v9n19/2007-0705-ns-9-19-00229.pdf>
- Espinosa Vizcaíno, I. A. (2018) *Rodamiento magnético aplicado a un aerogenerador de flujo axial*. Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería, Campus San Juan del Río. Tesis de grado: Maestro en Ciencias (Mecatrónica) San Juan del Río, Querétaro Diciembre 2018.
<http://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/996/1/IG-0033-Isac%20Andren%20Espinosa%20Vizca%C3%ADno.pdf>
- Ferreiro García R*, Haro Casado M, Pérez Castelo J, Piñon Pazos A y Calvo Rolle J.L (s.f) *Diagnosis de Cojinetes Magnéticos Activos*. Universidade da Coruña. A Coruña, España.
<https://intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXVIII/documentos/1231-XXVIIIJA%20FG2.pdf>

- Fonseca, J. I. (2017). *Motor magnético impulsado por imanes permanentes*. Chihuahua. Obtenido de ¿Energía libre? motor magnético impulsado por imanes Permanentes. documents/pdf%20%20tesis/Jaime%20Lorenzo%20Fonseca%20MCTA%20ferro mag.pdf
- García P. (2013) Franklin Electric. Qué es el control PID <https://franklinlinkmx.wordpress.com/2013/09/05/que-es-el-control-pid/>
- Gestión de compras (2018). *Cojinetes y rodamientos*. Albacete, España. https://www.gestiondecompras.com/files/products/mechanical_components_hardware/cojinetes_rodamientos.pdf
- Henández, P. J. (2008). *Construcción y control de un levitador magneticos*. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/3792/CONSTRUCCYCONTROL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Herrera Luque, F. (1979) *Los amos del Valle*. Editor Oilgriv (v1.2) ePub base v2.1 <http://blog.pucp.edu.pe/blog/identidadperuana/wp-content/uploads/sites/291/2018/02/Los-Amos-del-Valle-Francisco-Herrera-Luque.pdf>
- IMA International (2018) Qué es la coercitividad de un imán. <https://www.imamagnets.com/blog/coercitividad-intensidad-campo-magnetico/>
- Interempresas (2006) Las “atracciones” múltiples de los cojinetes magnéticos. https://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/14732-Las-atracciones-multiples-de-los-cojinetes-magneticos.html
- Leira Rodríguez, R. & Gómez Suárez, J. (2018). *Electromagnetismo*. pág. 7. Recuperado el 06 de 12 de 2020, de https://www.edu.xunta.gal/centros/iesblancoamorculleredo/aulavirtual/pluginfile.php/35958/mod_resource/content/1/electromagnetismo.pdf
- Liaño Gómez, R. (2016). *Diseño y Comportamiento de cojinetes*. Escuela técnica superior de náutica universidad de Cantabria, España (pág. 153). Obtenido de <https://repositorio.unican.es> › Raquel Liaño Gómez pdf.
- Lindlau, J. D., & Knospe, C. R. (2002) Feedback linearization of an active magnetic bearing with voltage control IEEE Transactions on Control Systems Technology 10(1)21-31 <https://www.redalyc.org/pdf/2033/203353519014.pdf>

- López Arenales, J. C. (2004). *Cojinetes (Rodamientos) Teorías y aplicaciones*. Proyectos de ingeniería mecánica. (pág. 41). Obtenido de <http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/ing/pim/6.pdf>
- López, L. F. (2007) *Ley de faraday-lenz*. Recuperado el 09 de 03 de 2021, de <http://www2.ib.edu.ar/becaib/bib2007/LopezL.PDF>
- Mahindrakar, A., & Sankaranarayanan, V. (2007). Nonlinear control of a beam-balance system with a single electromagnet. In Proceedings of the International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems ACODS p.340-343 <https://www.redalyc.org/pdf/2033/203353519014.pdf>
- Martínez, J. E., & Bedoya, C. L. (2013). *Un Nuevo Modelo Basado en Funciones*. Redin Universidad de Antioquia, 13. M. Okano, T. Iwamoto, M. Senokuchi, S. Fuchino, Museo virtual de la ciencia (s. f.) Biografía de Hans Christian Oersted. España. <http://museovirtual.csic.es/salas/magnetismo/biografias/oersted.htm>
- Peretti G., Gallina S. H.; Felissia S. F, Lurgo G., Depetris L, Pipino H. (2014). *Sistema de levitación magnética de ejes rotantes para medición de desbalances*. Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. Departamento de Electrónica Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca. Argentina. pág. 5 http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/42886/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Perren, G. (2003). *Estudio de las aplicaciones prácticas de la levitación magnética (trenes Maglev)*, pág. 16. Obtenido de <https://www.fceia.unr.edu.ar/~fisica3/MagLev.pdf>
- Química.es (s.f.) William Gilbert. https://www.quimica.es/enciclopedia/William_Gilbert.html
- Sánchez Bas, P. (2018). *Diseño y construcción de un levitador magnético*. Universidad Pontificia ICAI - ICADE Comillas Madrid. (pág. 79). Obtenido de <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/21660/SanchezBas MemoriaTFG.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Semiconductores (s,f.) Capítulo I. Tesis. USON. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/23137/Capitulo1.pdf>
- Vélez Covo, A. V. (2005). *Ejes: Análisis y prevención de fallas en servicios*. Indisa. <http://www.indisa.com/indisaonline/anteriores/Indisa%20On%20line%2023.pdf>

Anexo A. Ficha técnica Imán W-05-N50-N

Datos técnicos y seguridad de uso

Webcraft GmbH Teléfono: +49 7731 939 839 1

www.supermagnete.es

Industriepark 206

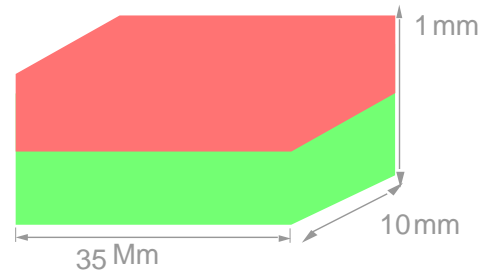
support@supermagnete.es

78244 Gottmadingen, Alemania

1) Datos técnicos




Cód. Artículo W-05-N50-N

EAN	7640155438728
Material	NdFeB
Forma	Cubo
Longitud del lado	10 mm
Tolerancia	+/- 0,1 mm
Revestimiento	niquelado (Ni-Cu-Ni)
Tipo de fabricación	sinterizado
Magnetización	N50
Fza. sujec.	aprox. 1,2 kg (aprox. 11,8 N)
Fuerza de desplazamiento	aprox. 240 g (aprox. 2,35 N)
Temperatura de servicio máx.	80°C
Peso	0,9500 g
Temperatura de Curie	310 °C
Remanencia Br	14000-14600 G, 1.40-1.43 T
Coercitividad bHc	10.8-12.5 kOe, 794-860 kA/m
Coercitividad iHc	≥875 kOe, ≥900 kA/m
Producto energético (BxH)max	47-51 MGOe, 383-398 kJ/m ³









Sin sustancias nocivas conforme a la directiva RoHS 2011/65/UE.



2) Advertencias

<p>Peligro</p> 	<p>Ingestión</p> <p>Los niños pueden tragarse los imanes pequeños.</p> <p>En caso de haber tragado varios imanes, éstos se pueden fijar en el intestino y causar complicaciones mortales.</p> <p>¡Los imanes no son juguetes! Asegúrese de mantenerlos fuera del alcance de los niños.</p>
<p>Advertencia</p> 	<p>Marcapasos</p> <p>Los imanes pueden alterar el funcionamiento de marcapasos y de desfibriladores implantados.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un marcapasos podría cambiarse al modo de prueba, lo que provocaría una indisposición. • Un desfibrilador podría incluso dejar de funcionar. • Si lleva alguno de estos dispositivos, manténgase a una distancia prudente de los imanes: www.supermagnete.es/faq/distance • Advierta siempre a las personas que lleven en este tipo de dispositivos de su proximidad a los imanes.
<p>Advertencia</p> 	<p>Fragmentos metálicos</p> <p>Los imanes de neodimio son frágiles. Si dos imanes chocan, pueden saltar fragmentos.</p> <p>Los fragmentos afilados pueden salir despedidos a varios metros de distancia y causar lesiones oculares.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evite que los imanes choquen entre sí. • Si va a manipular imanes grandes, póngase unas gafas protectoras. • Asegúrese de que las personas a su alrededor estén protegidas de igual modo o se mantengan a una distancia prudente.



3) Manejo y almacenamiento

<p>Atención</p> 	<p>Campo magnético</p> <p>Los imanes generan un campo magnético fuerte y de gran alcance, por lo que algunos dispositivos podrían estropearse, como por ejemplo: televisores, ordenadores portátiles, discos duros, tarjetas de crédito, soportes de datos, relojes mecánicos, audífonos y altavoces.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mantenga los imanes alejados de todos aquellos objetos y dispositivos que puedan estropearse debido a campos magnéticos fuertes. • Tenga en cuenta nuestra tabla de distancias recomendadas: www.supermagnete.es/faq/distance
<p>Atención</p>	<p>Inflamabilidad</p> <p>Si los imanes se mecanizan, el polvo de perforación se puede inflamar fácilmente.</p>

	<p>Evite este tipo de mecanizado de los imanes o utilice una herramienta adecuada y agua refrigerante en abundancia.</p>
<p>Atención</p> 	<p>Alergia al níquel</p> <p>La mayoría de nuestros imanes contiene níquel, incluso los que no llevan revestimiento de níquel.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Algunas personas tienen reacciones alérgicas al entrar en contacto con el níquel. • Las alergias al níquel se pueden desarrollar debido al contacto continuado con objetos que contienen níquel. • Evite que la piel entre en contacto con imanes de forma continuada. • No haga uso de imanes si ya tiene alergia al níquel.
<p>Aviso</p> 	<p>Efecto sobre las personas</p> <p>Según los conocimientos actuales, los campos magnéticos de imanes permanentes no tienen ningún efecto positivo o negativo apreciable sobre las personas. Es muy improbable que el campo magnético de un imán permanente pueda suponer un riesgo para la salud, pero no se puede excluir del todo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Por su seguridad, evite el contacto continuo con imanes. • Mantenga los imanes grandes al menos a un metro de distancia de su cuerpo.
<p>Aviso</p> 	<p>Fragmentación del revestimiento</p> <p>La mayor parte de nuestros imanes de neodimio dispone de un revestimiento fino de níquel-cobre-níquel para protegerlos de la corrosión. Este revestimiento puede fragmentarse o resquebrajarse al ser golpeado o expuesto a grandes presiones. Esto provoca que los imanes se hagan más sensibles ante condiciones ambientales como la humedad, pudiendo llegar a oxidarse.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Separe los imanes grandes, especialmente las esferas, con ayuda de un trozo de cartón. • Evite que los imanes choquen entre sí, así como las cargas mecánicas continuadas (p. ej. impactos).
<p>Aviso</p> 	<p>Oxidación, corrosión, herrumbre</p> <p>Los imanes de neodimio no tratados se oxidan muy rápidamente y se deshacen.</p> <p>La mayor parte de nuestros imanes dispone de un revestimiento fino de níquel-cobre-níquel para protegerlos de la corrosión. Este revestimiento también ofrece cierta protección frente a la corrosión, pero no resulta lo suficientemente resistente en caso de un uso continuado en espacios exteriores.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilice los imanes tan sólo en espacios interiores secos o protéjalos de las condiciones ambientales. • Evite dañar el revestimiento.
<p>Aviso</p>	<p>Resistencia a la temperatura</p> <p>Los imanes de neodimio tienen una temperatura de uso máxima de entre 80 y 200 °C.</p>

	<p>La mayor parte de los imanes de neodimio pierde parte de su fuerza de sujeción de manera permanente a partir de los 80 °C.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • No utilice los imanes en aquellos lugares donde vayan a estar expuestos a temperaturas altas. • Si utiliza pegamento, evite endurecerlo con aire caliente.
<p>Aviso</p> 	<p>Mecanizado</p>
	<p>Los imanes de neodimio son frágiles, termosensibles y se oxidan fácilmente.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los imanes se pueden fragmentar si se utiliza una herramienta inadecuada a la hora de perforarlos o serrarlos. • Los imanes se pueden desmagnetizar como consecuencia del calor producido. • Si el revestimiento está dañado, el imán se oxida y se deshace.
	<p>Evite la mecanización de imanes si no dispone de las máquinas y la experiencia necesarias. En su lugar, solicite una oferta para una producción a medida: www.supermagnete.es/custom_form.php</p>

4) Instrucciones para el transporte

<p>Atención</p> 	<p>Transporte aéreo</p>
	<p>Los campos magnéticos de los imanes embalados de manera inadecuada pueden alterar el funcionamiento de los dispositivos de navegación de los aviones. En el peor de los casos, se podría producir un accidente.</p> <ul style="list-style-type: none"> • En caso de transporte aéreo, envíe los imanes única y exclusivamente en embalajes con suficiente protección magnética. • Tenga en cuenta las normas correspondientes: www.supermagnete.es/faq/airfreight
<p>Atención</p> 	<p>Envíos postales</p>
	<p>Los campos magnéticos de los imanes embalados de manera inadecuada pueden provocar daños en los dispositivos de clasificación postal, así como en las mercancías frágiles de otros embalajes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tenga en cuenta nuestros consejos para el envío: www.supermagnete.es/faq/shipping • Utilice una caja con el suficiente espacio y coloque los imanes en el centro del embalaje con ayuda de material de relleno. • Coloque los imanes en el embalaje de manera que los campos magnéticos se neutralicen entre sí. • Utilice placas de acero para proteger del campo magnético, en caso necesario. • Para el transporte aéreo, se aplican normas más estrictas: tenga en cuenta las advertencias para el "transporte aéreo".

5) Instrucciones para una correcta eliminación

Las cantidades pequeñas de imanes de neodimio gastados se pueden depositar en la basura común. Las cantidades mayores de imanes se deben llevar a los puntos de recogida de residuos metálicos.

6) Disposiciones legales

Nuestros imanes de neodimio no están destinados a la distribución/exportación a EEUU, Canadá y Japón. Por ello, queda expresamente prohibido exportar de manera directa o indirecta a los países indicados anteriormente los imanes de neodimio suministrados por nosotros o los productos finales elaborados con estos imanes.

Código TARIC: 8505 1100 65 0

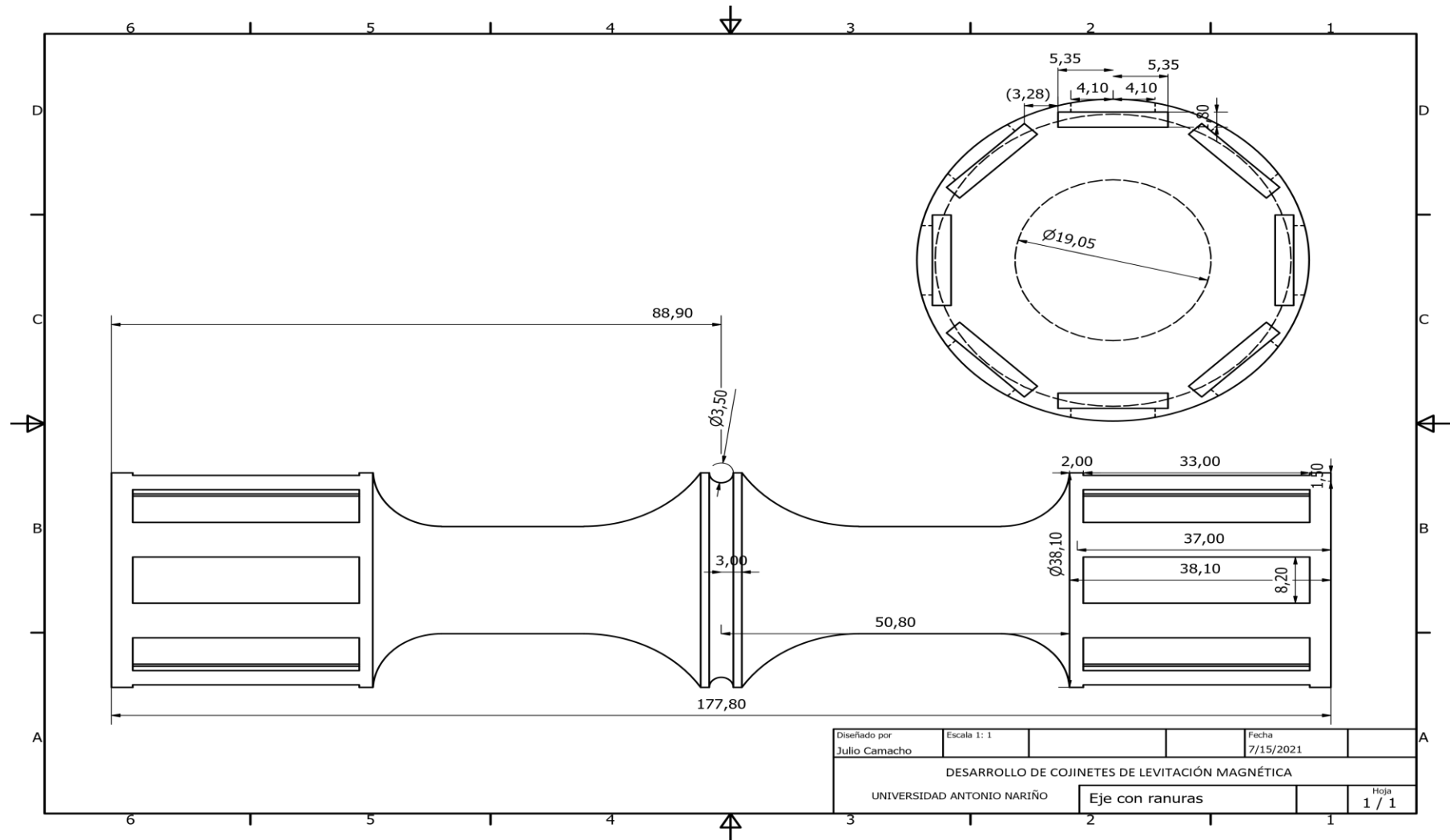
Origen: China

Para más información sobre imanes, consulte la página

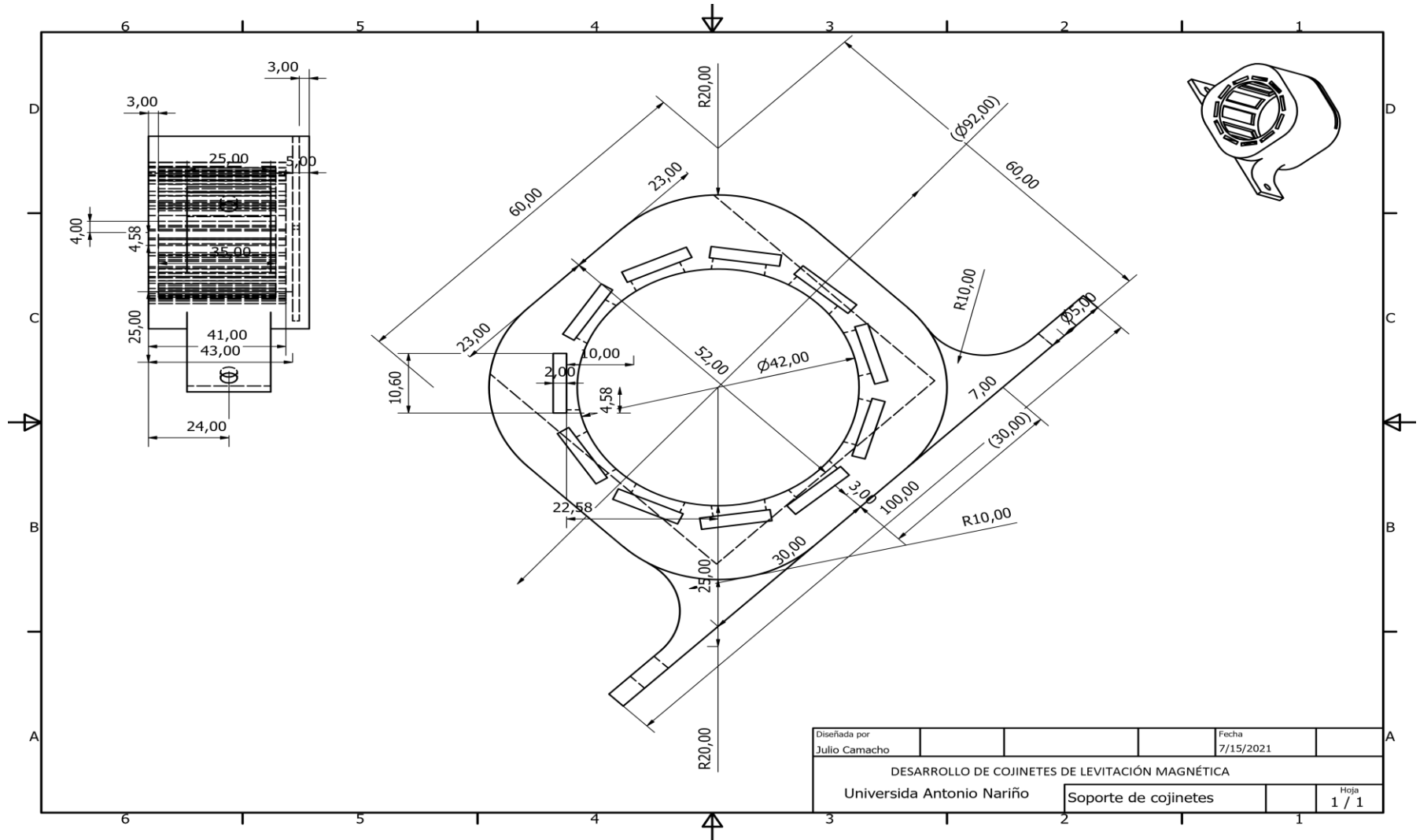
www.supermagnete.es/faq.php

Fecha de los datos: 10.03.2017

Anexo B. Eje con ranuras



Anexo C. Soporte de cojinetes



Diseñada por Julio Camacho	Fecha 7/15/2021
DESARROLLO DE COJINETES DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA	
Universida Antonio Nariño	Soporte de cojinetes
Hoja 1 / 1	

Anexo D. Ranura para imán

